

Zerstörungsfreie Prüfung der Bewehrung von Betonbauteilen mithilfe der magnetischen Streufeldmethode

Holger Diederich

KEYWORDS:

Magnetic flux leakage method, non-destructive testing, fatigue breaks, corrosion damage, reinforcing steel, condition survey

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Holger Diederich:

Zerstörungsfreie Prüfung der Bewehrung von Betonbauteilen
mithilfe der magnetischen Streufeldmethode

Bericht IBK Nr. 369, November 2016

© 2016 Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Zürich

Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in Switzerland

Sie finden das Verzeichnis der IBK-Publikationen auf unserer Homepage unter:

The catalogue of IBK publications is available on our homepage at:

www.ibk.ethz.ch/publications

Die meisten Berichte von Nr. 270 bis Nr. 333 sind auch noch in gedruckter Form unter Angabe der ISBN-Nr. erhältlich bei:

Most reports from No. 270 to No. 333 can still be purchased in printed form by indicating the ISBN number from:

AVA Verlagsauslieferung AG

Centralweg 16

CH-8910 Affoltern am Albis

Tel. ++41 44 762 42 00

Fax ++41 44 762 42 10

e-mail: avainfo@ava.ch

Berichte ab Nr. 334 sind nur noch in elektronischer Form verfügbar. Sie finden die entsprechenden Dateien in der e-collection der ETH Bibliothek unter <http://e-collection.library.ethz.ch> oder über die Links auf unserer Homepage.

Reports from No. 334 onwards are only available in electronic form. The respective files can be found in the e-collection of the ETH Library at <http://e-collection.library.ethz.ch> or through the links on our homepage.

**ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG DER BEWEHRUNG VON
BETONBAUTEILEN MIT HILFE DER MAGNETISCHEN
STREUFELDMETHODE**

HOLGER DIEDERICH

INSTITUT FÜR BAUSTATIK UND KONSTRUKTION
EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH

ZÜRICH
NOVEMBER 2016

Vorwort

Im Rahmen der Brückenforschung haben wir uns in meiner Gruppe dem Problem der Ermüdung von Stahlbetontragwerken angenommen, da diese infolge des steigenden Verkehrsvolumens und der Ausnützung oder auch Überschreitung der zulässigen Achslasten auch für Strassenbrücken in den nächsten Jahren virulent werden dürfte. Bei Ermüdungsversuchen an grossmassstäblichen Versuchskörpern besteht der Bedarf nach einer zerstörungsfreien Detektion von Brüchen der Bewehrungsstäbe in den Belastungspausen, da die Betonüberdeckung erst nach Versuchsende entfernt werden kann. Für diese Aufgabe hat sich die magnetische Streufeldanalyse als tauglich erwiesen. Thomas Wolf, der Vorgänger von Holger Diederich in dieser Forschungsrichtung, hat gezeigt, dass die Detektion von Brüchen mit Hilfe des remanenten Magnetfelds grundsätzlich möglich ist. Aus seiner Arbeit ging jedoch auch hervor, dass sowohl bei den Sensoren auch als bei der Datenauswertung noch Optimierungspotenzial besteht, und dass wohl die Messungen mit einem aktiven Feld anstelle einem remanenten vorteilhafter sind. Holger Diederich hat sich diesen Optimierungen angenommen. Er hat einerseits mit analytischer Schärfe und andererseits mit praktischem Tüftlersinn der magnetischen Streufeldmethode ein erfolgversprechendes Anwendungsfeld erschlossen, das weit über die Detektion von Ermüdungsbrüchen hinausreicht. Für die Praxis ist diese Anwendung von grosser Relevanz und ermöglicht neue Erkenntnisse bei der Zustandserfassung und -beurteilung von bestehenden Betontragwerken.

Zürich, Oktober 2016

Thomas Vogel

Zusammenfassung

Mit der Zunahme des Verkehrsaufkommens, begrenzten Platzverhältnissen in den Ballungsgebieten, sowie der Altersverteilung der bestehenden Infrastruktur wird die Erhaltung von Tragwerken künftig eine noch wichtigere Rolle spielen. Damit steigt auch der Bedarf nach geeigneten Prüfmethoden zur Zustandserfassung.

Eine dieser Prüfmethoden ist die magnetische Streufeldmethode. Bisher ist die praktische Bedeutung dieser Methode gering, obwohl es für die zerstörungsfreie Detektion von Schäden in der Bewehrung keine überzeugenden Alternativen gibt. Einige Probleme, die dem Praxiseinsatz bisher entgegenstanden, konnten mit der vorliegenden Arbeit gelöst werden, um so einen weiteren Schritt in Richtung etablierte Prüfmethode zu gehen.

Mithilfe von magnetischen Gleichfeldern ist es möglich, Schadstellen in der ferromagnetischen Bewehrung von Stahlbetonbauteilen zu detektieren. An der Schadstelle entsteht dabei ein Streufeld, das durch eine geeignete Messapparatur erfasst und mittels Software dargestellt und ausgewertet werden kann. Auf diese Weise konnten mit dem entwickelten Verfahren Ermüdungsbrüche und Korrosionsschäden zerstörungsfrei innerhalb von üblichen Bewehrungsüberdeckungen geortet werden.

Nach wie vor sind für den Praxiseinsatz der Methode die unterschiedlichen, komplizierten und teilweise auch unbekannten Bewehrungslayouts eine Herausforderung. Dieser Herausforderung wurde begegnet durch den Bau eines neuen Messwagens, der eine flächige Magnetisierung und eine Messung in guter Geschwindigkeit und hoher Auflösung erlaubt. Um den höheren Informationsgehalt dieser Messung auch auszunutzen, wurde eine neue Darstellungsform entwickelt, die eine intuitive und zuverlässige Interpretation der Messergebnisse ermöglichen soll. Eine speziell entwickelte Software unterstützt den Benutzer dabei mit bildverbessernden Massnahmen. Zusätzlich wird über ein Verfahren aus der Mustererkennung ein Ansatz für eine automatische Auswertung der Messdaten geschaffen.

Schliesslich konnte die Verwechslungsgefahr zwischen Schadsignalen und Signalen der intakten Bewehrung weiter reduziert werden. Im Labor- und Feldversuch konnte der Nutzen der Methode belegt werden. Eine weitere Verbesserung der Handhabung, der Signalqualität und Zuverlässigkeit, sowie des Gewichts des Messgerätes ist möglich und auch notwendig. Eine Kombination mit anderen Prüfmethoden ist denkbar und prüfenswert.

Abstract

The conservation and maintenance of existing infrastructure will play an increasingly important role in the near future due to increases in traffic volume, the limited space in metropolitan areas as well as the aging of existing structures. A direct consequence of these factors is the necessity for suitable testing methods to survey the condition of such structures.

One of these testing methods is the magnetic flux leakage method. Thus far, the practical application of this method has remained limited, even though no convincing alternatives exist for the non-destructive detection of damage in the steel reinforcement. Several problems, which previously hindered the practical application of this method, were solved in this work. Hence, another step was taken towards developing this method into an established test procedure.

Damage locations in the ferromagnetic reinforcement of reinforced concrete elements can be detected with the help of constant magnetic fields. A magnetic flux leakage is observed at the damage location, which can be measured with appropriate measurement equipment and represented as well as analysed with a software. Utilising these principles, the developed method enables the non-destructive detection of fatigue fractures and corrosion damage in the reinforcing steel within the typical concrete cover.

The practical application of this method remains a challenge due to varying, often complex and partly unknown reinforcement layouts. This challenge was confronted through the construction of a new measurement vehicle which enables a simultaneous planar magnetisation and measurement at reasonable velocity and of high resolution. A new form of representation was developed in order to fully utilise the higher information content of these measurements. This enables an intuitive and reliable interpretation of the measurement. A specifically developed software assists the user with image enhancement processes. In addition, a pattern recognition algorithm was implemented to enable an automatic analysis of the results.

In conclusion, the likelihood of confusing damage signals and the signals arising from undamaged reinforcement was further reduced. The advantages of this method could be illustrated in laboratory tests and in field measurements. Further improvements in aspects such as the ease of handling, signal quality and reliability as well as reduction of the weight of the measurement device are possible and deemed to be necessary. Furthermore, a combination with other testing methods is also possible and merits further investigation.

Résumé

En vue de l'accroissement du volume du trafic, le manque d'espace dans les conurbations en plus de l'âge avancé de l'infrastructure existante, la conservation des structures jouera un rôle important dans le futur. De ce fait, le besoin d'une méthode de contrôle appropriée pour la détection de l'état actuel des structures augmente.

La technique de contrôle par flux de fuite magnétique est l'une de ces méthodes. Même s'il n'existe aucune alternative convaincante pour la détection non-destructive de dégâts dans les barres d'armature, la portée pratique de cette méthode reste limitée. Dans ce présent travail, quelques problèmes qui empêchaient l'utilisation pratique de cette technique ont pu être résolus, permettant de faire un autre pas vers son établissement.

Les zones endommagées de l'armature ferromagnétique peuvent être détectées à l'aide d'un champ magnétique continu. Un champ de dispersion magnétique apparaît alors dans ces zones de dégâts. Celui-ci peut être saisi avec un appareil de mesure approprié ainsi que visualisé et analysé grâce à un programme informatique. Le développement de cette procédure a permis la détection des fractures de fatigue et des dommages dus à la corrosion de façon non-destructive pour les valeurs habituelles de la couverture de béton.

Les dispositions d'armature différentes, complexes et en partie inconnues représentent encore un défi pour cette méthode de contrôle. Pour relever ce défi, un nouveau véhicule de mesure a été construit qui permet une magnétisation de la surface et des mesures à bonnes vitesses ainsi qu'une haute résolution. Pour profiter du contenu informatif plus élevé obtenu par la méthode de contrôle par flux de fuite, une nouvelle visualisation des données a été développée, permettant une interprétation intuitive et fiable des résultats de mesure. Un logiciel spécialement développé aidant à améliorer les images soutient l'utilisateur en cela. De plus, une approche pour l'évaluation automatique des données de mesures via un procédé de reconnaissance de formes est établie.

Finalement, le risque de confusion entre un signal causé par un dégât et un signal émis de l'armature intacte a pu être réduit. L'utilisation de la méthode a pu être vérifiée aussi bien dans le laboratoire que sur le terrain. Une amélioration de la manipulation, de la qualité et de la fiabilité du signal ainsi que la réduction du poids du véhicule de mesure sont possibles et nécessaires. Une combinaison avec d'autres méthodes de contrôle est envisageable et mérite considération.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Problemstellung	15
1.2	Zielsetzung	16
1.3	Abgrenzung	17
2	Grundlagen	19
2.1	Geschichte des Magnetismus	19
2.2	Physikalische Grundlagen des Magnetismus	22
2.2.1	Auswirkungen des Magnetismus	23
2.2.2	Quellen des Magnetfelds	23
2.2.3	Atomistische Deutung des Magnetismus	24
2.2.4	Arten des Magnetismus	25
2.2.5	Ferromagnetische Hysterese	27
2.2.6	Temperaturabhängigkeit	28
2.2.7	Entmagnetisierungsfaktor	29
2.2.8	Weiss'sche Bezirke und Bloch-Wände	30
2.2.9	Barkhausen-Sprünge	30
2.3	Neuronale Netze	31
2.3.1	Bestandteile neuronaler Netze	31
2.3.2	Topologie des FeedForward-Netzes	31
2.3.3	Informationsverarbeitung innerhalb des Neurons	31
2.3.4	Lernprozess des Netzes	32
3	Stand der Forschung	33
3.1	Das magnetische Streufeld	33
3.2	Detektion von Spannstahlbrüchen	34
3.2.1	F. N. Kusenberger und J. R. Barton	34
3.2.2	Horst Scheel und Bernd Hillemeier	34
3.2.3	Gottfried Sawade und Hans-Joachim Krause	35
3.2.4	Chol-I Pak und Bernd Hillemeier	36
3.2.5	Andrei Walther und Bernd Hillemeier	37
3.3	Detektion von Betonstahlbrüchen	37
3.4	Mikromagnetische Verfahren	38

4	Methode zur Messung und Auswertung	39
4.1	Vorgehen zur Ortung von Betonstahlbrüchen	39
4.1.1	Bewehrung	39
4.1.2	Magnet	40
4.1.3	Magnetfeld	40
4.1.4	Magnetisierung	40
4.1.5	Remanenz	41
4.1.6	Streufeld	41
4.1.7	Remanenzmessung	42
4.1.8	Aktivmessung	42
4.2	Stabsignale und Bruchsignale	43
4.3	Superpositionsprinzip	45
4.4	Simulationen	45
4.5	Detektion	46
4.5.1	Neuronale Netze	46
4.5.2	Bildvergleich mittels Korrelationskoeffizient	49
4.6	Untersuchung verschiedener Schadensarten	51
4.7	Abgrenzung Schadsignal zu intakter Bewehrung	54
5	Geräteentwicklung und Messapparatur	55
5.1	Messwagen Wolf remanent	55
5.2	Messwagen Wolf aktiv	56
5.3	Prototyp 1 Hall analog	56
5.3.1	Vergleich analoger Hall-Sensoren	58
5.4	Prototyp 5 Hall analog	58
5.4.1	Entwurf der Kerne	60
5.5	Prototyp 20 Hall digital	63
5.5.1	Superpositionsprinzip	64
5.6	Prototyp 20 Hall digital kernlos	65
6	Entwicklung der Software Streufeld	69
6.1	Messung	69
6.1.1	Echtzeitmessung über die Breite	70
6.1.2	Echtzeitmessung über die Fläche	70
6.1.3	Aufnahmefunktion	71
6.1.4	Gespeicherte Messreihen	72
6.2	Nachbearbeitung	72
6.2.1	Informationen	72
6.2.2	Bearbeiten	72
6.2.3	Auflösung	73
6.2.4	Kalibrierung	73
6.2.5	Kontrast	76
6.2.6	Interpolation	77
6.2.7	Berechnen	78

6.3	Positionierung	79
6.3.1	Farbkanal	79
6.3.2	Vertikale Ausrichtung	79
6.3.3	Horizontale Ausrichtung	79
6.3.4	Koordinaten	79
6.3.5	Reihenfolge	80
6.3.6	Resultat	80
7	Ermüdungsversuche	81
7.1	Forschungsziele Ermüdung	81
7.2	Forschungsziele magnetische Streufeldmethode	84
7.2.1	Eigenschaften der Brüche	84
7.2.2	Bewehrungslayout und Bruchbild	84
7.3	Messergebnisse und Interpretation	85
7.3.1	Störsignale in den Experimenten	85
7.3.2	Unterschied zwischen Ober- und Unterlastmessung	86
7.3.3	Bruchkriterium und Detektierbarkeit	86
7.3.4	Ergebnisse Versuchskörper A1	87
7.3.5	Ergebnisse Versuchskörper A2	87
7.3.6	Ergebnisse Versuchskörper B1	88
7.3.7	Ergebnisse Versuchskörper B2	89
7.3.8	Erkenntnisse und Fazit	89
7.3.9	Modifikationen des Algorithmus	106
8	Feldversuche in Wildegg, Kanton Aargau	107
8.1	Lehnenviadukt Wassnerwald, Kanton Uri	107
8.2	Ablauf und Auswertung der Messungen	107
8.3	Sondage zur Verifizierung der Schäden	109
8.4	Erkenntnisse und Fazit	112
9	Schlussfolgerungen	113
9.1	Weiterentwicklung	113
9.2	Erkenntnisse	113
9.2.1	Auswertungen	114
9.2.2	Verschiedene Schadensarten	115
9.2.3	Verschiedene Magnetisierungseinrichtungen	115
9.3	Weiterer Forschungsbedarf	115
	Abbildungsverzeichnis	117
	Tabellenverzeichnis	121
	Literaturverzeichnis	123

1 Einleitung

Die Erhaltung von Tragwerken nimmt einen immer höheren Stellenwert ein. Nicht nur, weil die Instandsetzung eines Tragwerks im Gegensatz zum Neubau häufig wirtschaftlicher ist, sondern auch, weil sie in vielen Fällen die einzig mögliche Lösung darstellt. Gerade im dicht besiedelten Raum sind Neubauten und besonders Ersatzneubauten nur noch selten realisierbar. Enge Platzverhältnisse und verkehrstechnische Überlegungen legen Erhaltungsmassnahmen nahe, die mit möglichst wenigen und möglichst kurzen Sperrungen auskommen.

Besondere Herausforderungen stellen sich durch die Altersverteilung der bestehenden Bauten: So wurden beim schweizerischen Nationalstrassennetz eine deutliche Mehrheit der Brücken in den Sechziger- und Siebzigerjahren in Betrieb genommen ([VOGEL *et al.* 2009]). Durch die ungleiche Altersverteilung (Abb. 1.1) ist davon auszugehen, dass bei vielen Tragwerken in naher Zukunft der Bedarf nach umfangreichen Untersuchungen und Massnahmen zunehmen wird.

Eine wachsende Verkehrsdichte, erheblich höhere Verkehrslasten als bei der Errichtung der Kunstbauten geplant, sowie die Forderung von Politik und Verbänden nach einer weiteren Erhöhung der zulässigen Gesamtlast bedingen nicht nur eine reine statische Nachrechnung der bestehenden Tragwerke, sondern auch eine sorgfältige Überprüfung des aktuellen Zustandes. Hier sind leistungsfähige Prüfmethode nötig, die aussagekräftige Ergebnisse liefern.

Für die Inspektion bestehender Tragwerke steht bereits eine Vielzahl von Prüfmethode zur Verfügung, darunter sowohl zerstörende, als auch zerstörungsfreie und zerstörungsarme. Die einzelnen Prüfmethode messen meist einen physikalischen oder chemischen Effekt oder eine Kombination aus mehreren Effekten und haben dabei ihre ganz spezifische Aufgabe, aber auch ihre individuellen Grenzen. Eine universelle Methode gibt es nicht, vielmehr muss der Ingenieur in einer Erhaltungssituation die Entscheidung treffen, welche Kombination von Methoden für die jeweilige Problemstellung angemessen ist.

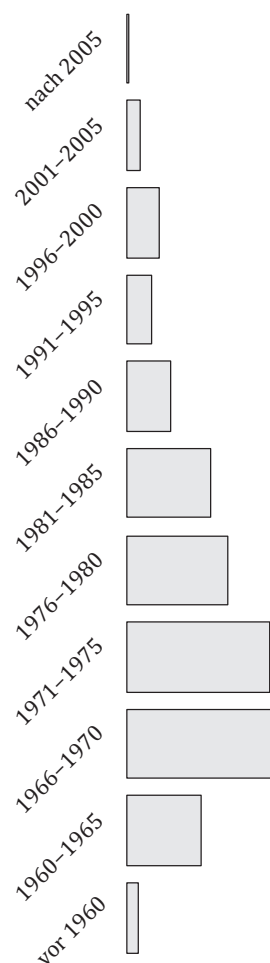


Abb. 1.1 Brücken im Nationalstrassennetz nach Jahr der Inbetriebnahme, nach [VOGEL *et al.* 2009]

1.1 Problemstellung

Im Rahmen einer Dissertation zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken ([FEHLMANN 2012]) am Institut für Baustatik und Konstruktion an der ETH

Zürich, bestand seit dem Jahr 2008 der Bedarf nach einer Prüfmethode, mit der Betonstahlbrüche detektiert werden können. Dabei musste die Detektion zerstörungsfrei erfolgen, um regelmässige Messungen in den Belastungspausen zu ermöglichen. Bekannte Verfahren, wie beispielsweise das Durchstrahlungsverfahren wurden aufgrund der heiklen Anwendung und des Aufwandes verworfen. Auch wäre die Detektion von Ermüdungsbrüchen mittels Durchstrahlung besonders erschwert, wenn die Ausrichtung der Bruchflächen nicht mit der Richtung der Strahlung übereinstimmt.

Man entschied sich dafür, die magnetische Streufeldmethode, die sich im Bauwesen bereits bei der Detektion von Spannstahlbrüchen bewährt hatte, nun auch für die Detektion von Brüchen der schlaffen Bewehrung zu verwenden. Die Resultate dieser neuen Anwendung lassen sich in der Dissertation von Dr. Thomas Wolf nachlesen. Die Arbeit [WOLF 2012] ermöglicht für die Detektion von Betonstahlbrüchen eine zuverlässige stabweise Messung, Darstellung und Auswertung bei einer Messtiefe, die in etwa der üblichen Bewehrungsüberdeckung entspricht. Weiteren Forschungsbedarf sah Wolf bei der Steigerung der Detektionsrate, speziell bei komplexen Bewehrungsanordnungen.

1.2 Zielsetzung

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen soll die magnetische Streufeldmethode für die Bruchdetektion an schlaffer Bewehrung in einigen Punkten erweitert und verbessert werden.

Gegenüber [WOLF 2012] soll die Messung nun nicht mehr stabweise, also eindimensional, erfolgen, sondern mit einer gewissen Messbreite flächig, also zweidimensional. Dies hat zum einen den Vorteil, dass je nach Messbreite mehrere Stäbe gleichzeitig erfasst werden können, und zum anderen muss die genaue Position der Stäbe vor der Messung nicht bekannt sein, sondern nur deren Ausrichtung. Bereits in Vorversuchen und Simulationen konnte gezeigt werden, dass die flächige Messung einen nutzbar höheren Informationsgehalt hat. Es stehen somit zusätzliche Beurteilungskriterien zur Verfügung, wobei insbesondere bei komplexen und unbekannten Bewehrungsanordnungen ein Nutzen erwartet wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit ist zu zeigen, welche Kriterien dies sind und inwieweit sie die Aussagekraft der Methode verbessern.

Eine flächige Messung bedingt konzeptionelle Änderungen im Messablauf. Es ist nicht ausreichend, lediglich eine Messeinrichtung mit breiterem Sensor-Array zu konstruieren. Die Magnetisierungseinrichtung muss ebenfalls angepasst werden. Bisher wurden die Bewehrungsstäbe einzeln mit einem permanenten Stabmagnet magnetisiert. Vorversuche haben gezeigt, dass es bei diesem Arbeitsablauf nicht möglich ist, mehrere Stäbe für eine breite Messung vorzubereiten. Versucht man einen Stab zu magnetisieren, indem man den Permanentmagnet darüber bewegt, werden die Nachbarstäbe leicht

entmagnetisiert. Es wird daher eine Magnetisierungseinrichtung benötigt, die in der Lage ist, mehrere benachbarte Stäbe gleichermassen zu magnetisieren. Möglich wäre eine breite Spezialanfertigung eines Permanentmagnets. Der gewünschten Form sind durch den Entmagnetisierungsfaktor Grenzen gesetzt. Die bessere Wahl ist ein Elektromagnet, weil dadurch eine flexible Wahl von Geometrie und Stärke möglich wird.

Eine Messeinrichtung, die auf einen Elektromagnet anstelle eines Permanentmagnets zurückgreift, erlaubt zwei Arten von Messungen: Es kann zum einen das Magnetfeld gemessen werden, während sich die Bewehrung im Einflussbereich des aktiven Magnets befindet. Dies nennt man das aktive Feld. Zum anderen kann das Magnetfeld gemessen werden, das von der Bewehrung ausgeht, wenn der Elektromagnet schon wieder abgeschaltet wurde. Dieses nennt man das remanente Feld. Bei Wolf wurde bei der Detektion von Betonstahl grundsätzlich remanent gemessen. Aus dem Literaturstudium zu Anwendungen der magnetischen Streufeldmethode mit Spannstahl kann vermutet werden, dass aktive Messungen auch hier eine Verbesserung der Signalstärke ermöglichen.

In welchem Ausmass eine Verbesserung der Methode im Rahmen dieser Arbeit möglich ist, liess sich anfangs nur sehr schwer abschätzen. Umso erfreulicher ist es, dass schlussendlich der Sprung vom Laborversuch zum Feldversuch gelingen durfte. Die Idee, auch Korrosionsschäden zu untersuchen, wurde erst in einem späteren Stadium des Projekts eingebracht. Der Einsatzbereich der Methode wird dadurch gegenüber der ursprünglichen Fragestellung zu Ermüdungsschäden deutlich ausgeweitet.

1.3 Abgrenzung

Wie eingangs erwähnt, hat jede Prüfmethode ihre eigene, klar definierte Aufgabe. Nur durch die Fokussierung auf einen Zweck liefert eine Methode exakte Ergebnisse. In gewissen Grenzen erlauben die flächigen Messungen mit der magnetischen Streufeldmethode eine Ortung der Bewehrung. Es gibt sogar Forschungsarbeiten, die eine Abschätzung des Durchmessers oder der Überdeckung versuchen. Ziel dieser Arbeit ist alleine die Ortung von Schäden im Betonstahl, da hier ein Lücke besteht, die sich mit den gängigen Prüfmethoden aktuell nicht schliessen lässt.

2 Grundlagen

Nach einer kurzen Zusammenfassung der Geschichte des Magnetismus (mit Illustrationen von Wikimedia Commons) von dessen Entdeckung bis zu seiner Erforschung werden die physikalischen Grundlagen so weit dargestellt, wie sie zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind.

2.1 Geschichte des Magnetismus

Gemäss [BROCKHAUS 1998] ist der Magnetismus eines der am längsten bekannten physikalischen Phänomene. Möglicherweise war eine frühe Form des Magnetkompass schon im 26. Jh. v. Chr. in China in Gebrauch.

In griechischen Schriften wird Magnetit bereits im 8. Jh. v. Chr. erwähnt. Magnetit ist als weit verbreitetes und magnetisches Eisenerz Namensgeber des Magnetismus und führte aufgrund seiner weiten Verbreitung früh in der Menschheitsgeschichte zur Entdeckung magnetischer Phänomene. Bereits Thales von Milet (* 625 v. Chr., † 547 v. Chr.), ein griechischer Naturphilosoph, beschäftigte sich mit Magnetit und seiner Fähigkeit Eisen anzuziehen. Plinius der Ältere (* 23 n. Chr., † 79 n. Chr.) erwähnt in seinem umfassenden Werk der Naturgeschichte „Naturalis historia“ die Fähigkeit des Magnetit zur Magnetisierung von Eisen. [BROCKHAUS 1998]

Der Begriff Magnetit wird vom lateinischen Dichter Lukrez (* 97 v. Chr., † 55 v. Chr.) auf die thessalonische Stadt Magnesia zurückgeführt, wo das Mineral erstmals gefunden worden sein soll. Plinius führt den Begriff auf einen Hirten namens Magnes zurück, der auf dem Berg Ida durch seine eisernen Schuhnägel und die eiserne Spitze seines Stabes festgehalten worden sein soll. [BROCKHAUS 1998]

Der englische Lehrer und Wissenschaftler Alexander Neckam (* 1157, † 1217) lieferte in seinem Werk „De utensilibus“ die erste bekannte Erwähnung in Europa zum Magnetkompass. [ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA 2002]

Petrus Peregrinus (auch Pierre de Maricourt genannt) verfasste 1269 die erste ausführliche Abhandlung über den Magnetismus. Petrus Peregrinus diente in der Armee in einem Bereich, den man heute wohl als Genietruppe oder Ingenieurkorps bezeichnen würde. Seine „Epistola“ über den Magnetismus enthielt unter anderem das gesammelte Wissen aus eigenen Experimenten. So entdeckte er, dass Magnete zwei Pole haben und definierte diese als erster als Nord- und Südpol (Boreal und Austral). Er führte Versuche

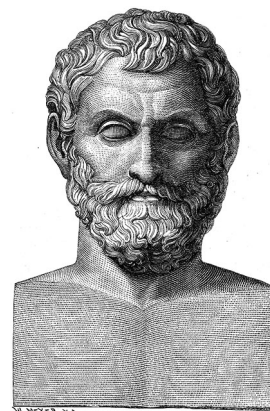


Abb. 2.1 Thales von Milet



Abb. 2.2 Plinius der Ältere



Abb. 2.3 Lukrez

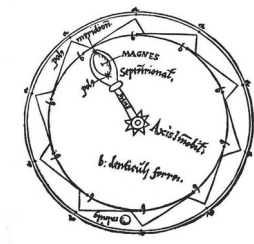


Abb. 2.4 Petrus Peregrinus magnetisches „Perpetuum Mobile“



Abb. 2.5 William Gilbert

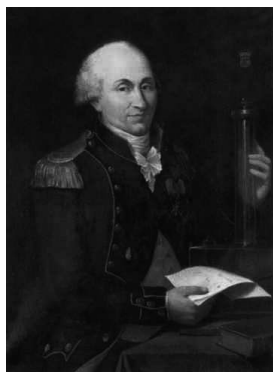


Abb. 2.6 Charles Augustin de Coulomb



Abb. 2.7 Siméon Denis Poisson

durch, in denen er Magnetit-Späne auf Wasser schwimmen liess und ihre Ausrichtung beobachtete. Ausserdem gab er Anleitung zur Magnetisierung von Kompassnadeln. Seine Versuche, mithilfe des Magnetismus ein Perpetuum Mobile zu konstruieren, schlugen fehl. Laut Roger Bacon war Peregrinus einer der ersten experimentellen Wissenschaftler. Peregrinus widerlegte durch seine Experimente damalige Annahmen, dass ein Magnet sich immer nach dem Ort ausrichte, wo er gefunden wurde, oder dass ein Magnet sich immer zum Polarstern ausrichte. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Später bot der englische Naturforscher und Arzt William Gilbert (* 1544, † 1603) mit seinem Werk „De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete Tellure physiologia nova“ eine Zusammenfassung der Erkenntnisse früherer Autoren. Er versuchte aus den gängigen Ansichten die beobachtbaren Erkenntnisse vom Aberglauben zu trennen. So widerlegte er Behauptungen, nach denen ein Magnet seine Wirkung auf Eisen verliere, falls Knoblauch oder Diamanten in der Nähe seien. Den medizinischen Aberglauben, der mit dem Magnetismus verbunden war, behielt Gilbert jedoch bei. Sein Werk enthielt zusätzlich eine Reihe von eigenen Beobachtungen und Erkenntnissen zum Magnetismus. Unter anderem fand er heraus, dass die Erde selbst magnetisch sein müsse. Schon Gilbert entdeckte, dass magnetisiertes Eisen seine Kraft verliert, wenn es zu stark erhitzt wird. Durch seine Abhandlung im gleichen Werk über Stoffe, die vergleichbar mit Bernstein nach dem Reiben kleinere Körper anziehen können, leitete Gilbert die Erforschung der Elektrizität ein, ohne jedoch einen direkten Zusammenhang mit dem Magnetismus zu postulieren. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Die erste im heutigen Sinne wissenschaftliche Untersuchung zum Magnetismus stammt vom Physiker und Ingenieur Charles Augustin de Coulomb (* 1736, † 1806). Von Coulomb stammt das als coulombsches Gesetz bekannte Abstandsgesetz von zwei punktförmigen elektrischen bzw. magnetischen Ladungen. Trotz dieser Gemeinsamkeit stellte Coulomb die Behauptung auf, dass Elektrizität und Magnetismus keine Beziehung zueinander haben. Unter Bauingenieuren ist derselbe Coulomb auch bekannt für seine umfassenden Arbeiten zur Mechanik, Baustatik, Festigkeitslehre, Reibung und Torsion. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Dem Mathematiker und Physiker Siméon Denis Poisson (* 1781, † 1840) gelang um 1820 als erstem die Beschreibung der Magnetostatik in Feldbegriffen. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Im gleichen Jahr machte der dänische Physiker und Chemiker Hans Christian Ørsted (* 1777, † 1851) in einer Vorlesung eine bedeutende Entdeckung: Eine Magnetnadel wurde durch elektrische Ströme abgelenkt. Ein Einfluss zwischen Elektrizität und Magnetismus wurde vorher bereits vermutet, da man wusste, dass ein Kompass bei Blitzschlag auf hoher See gelegentlich ausschlägt. Die historische Entdeckung in der Vorlesung wurde allerdings zunächst auch von Ørsted in ihrer Wichtigkeit deutlich unterschätzt. Der Effekt war sehr klein,

da Ørsted absichtlich einen sehr dünnen Draht wählte und da er ausserdem die Wirkung des Erdmagnetfeldes nicht eliminiert hatte. Erst Monate später nahm er weitere Experimente dieser Art auf und fand heraus, dass eine Kompassnadel von einem stromdurchflossenen Leiter abgelenkt wurde, selbst dann, wenn andere Gegenstände dazwischen positioniert wurden. Der Effekt war umso stärker, je dicker er den Draht wählte. Ørsted war nicht der erste, der einen Versuchsaufbau dieser Art gewählt hatte. Andere Forscher jedoch positionierten die Kompassnadel falsch, da sie davon ausgingen, dass der Leiter in jedem Fall ein Magnetfeld in seine Stromrichtung verursachen müsste. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Der französische Mathematiker und Physiker André Marie Ampère wandte sich nach dieser Entdeckung diesem neuen Gebiet des Elektromagnetismus zu. Durch eine geschickte Anordnung von Magneten eliminierte er die Wirkung des Erdmagnetfeldes, die damals Ørsteds Experiment verfälscht hatte. Ampère fand heraus, dass die Kompassnadel ihre Richtung wechselt, je nachdem, ob man sie über oder unter dem Leiter positioniert. Er zog daraus die korrekte Schlussfolgerung, dass sich das Magnetfeld kreisförmig um den Leiter windet. Mit diesem Wissen konstruierte er die erste Magnetspule, indem er den Draht um ein Glasrohr wickelte. Die Konstruktion wirkte wie erwartet wie ein Stabmagnet. Er postulierte, dass das Erdmagnetfeld ebenfalls auf Kreisströme zurückzuführen sei. Er entdeckte die Wechselwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern und das nach ihm benannte ampèresche Gesetz (parallele, gleichgerichtete Ströme ziehen sich an; parallele, entgegengesetzt gerichtete Ströme stossen sich ab). Er stellte die sogenannte Schwimmerregel, auch ampèresche Regel genannt, auf, die eine Aussage über die Richtung einer Magnetnadel in Bezug auf einen stromdurchflossenen Leiter erlaubt. Das Phänomen des Magnetismus führte Ampère auf hypothetische Molekularströme zurück. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Die Physiker Jean-Baptiste Biot (* 1774, † 1862) und Félix Savart (* 1791, † 1841) stellten 1820 unabhängig voneinander das nach ihnen benannte Gesetz der magnetischen Wirkung von elektrischen Strömen auf. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Wilhelm Eduard Weber (* 1804, † 1891) führte die Überlegungen von Ampère über die Molekularströme weiter: Als Ursache für den Magnetismus postulierte er molekulare Kreisströme. Im unmagnetisierten Zustand sind diese völlig ungeordnet. Bei der Magnetisierung eines Materials werden sie durch ein äusseres Magnetfeld ausgerichtet. Weber schuf ein elektrostatisches und elektromagnetisches Masssystem. Heute ist die SI-Einheit Weber (Wb) für den magnetischen Fluss nach ihm benannt. [BROCKHAUS 1998]

Michael Faraday (* 1791, † 1867) führte den Begriff der elektrischen und magnetischen Felder ein. In seinen Experimenten veranschaulichte er die Felder von verschiedenen Magnet-Anordnungen mithilfe von Eisenspänen.

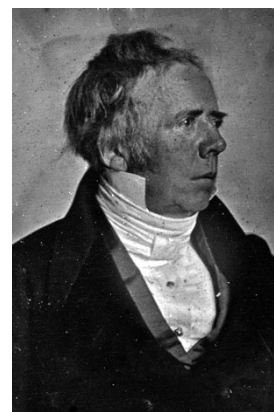


Abb. 2.8 Hans Christian Ørsted



Abb. 2.9 André Marie Ampère

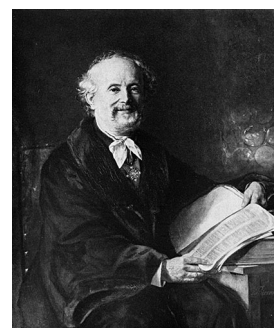


Abb. 2.10 Wilhelm Eduard Weber



Abb. 2.11 Michael Faraday

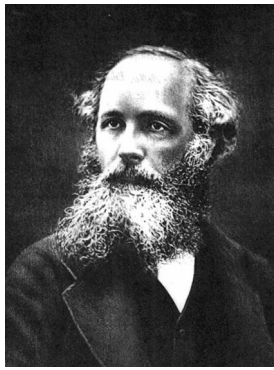


Abb. 2.12 James Clerk Maxwell

Er war der erste, der eine Art Elektromotor konstruierte. Er entdeckte 1831 die elektromagnetische Induktion, indem er zeigte, dass man nicht nur mit Elektrizität ein Magnetfeld erzeugen konnte, sondern bei geeigneter Versuchsanordnung auch das Gegenteil möglich ist. Er bemerkte 1845 einen Zusammenhang zwischen Magnetismus und Licht, und entdeckte ausserdem den Diamagnetismus. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Ausgehend von Faradays Idee des elektrischen Feldes formulierte James Clerk Maxwell (* 1831, † 1879) die vier Grundgleichungen der Elektrodynamik. Aus den Gleichungen liess sich die Existenz elektromagnetischer Wellen ableiten und auch, dass sich diese mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Maxwell schloss daraus, dass Licht eine elektromagnetische Strahlung ist. [BROCKHAUS 1998]



Abb. 2.13 Heinrich Rudolf Hertz

Maxwells theoretische Voraussagen wurden schliesslich von Heinrich Rudolf Hertz (* 1857, † 1894) experimentell bestätigt. Hertz untersuchte die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und widerlegte mit seinen Erkenntnissen Theorien, die mit dem Konzept von Faraday und Maxwell konkurrierten. Er legte den Grundstein für die heutige Funktechnik. ([BROCKHAUS 1998], [VERSCHUUR 1993])

Albert Einstein (* 1879, † 1955) zeigt 1905 im Rahmen der Relativitätstheorie, dass Magnetfelder eine untrennbare Begleiterscheinung bewegter elektrischer Ladungen sind. [BROCKHAUS 1998]

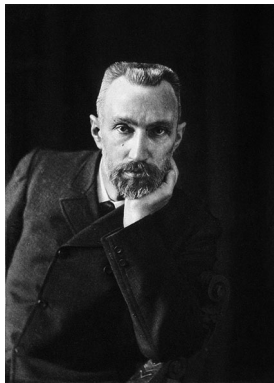


Abb. 2.14 Pierre Curie

Pierre Curie (* 1859, † 1906) führte mit einer selbst entwickelten empfindlichen Torsionswaage Messungen durch und entdeckte die Temperaturunabhängigkeit des Diamagnetismus, die Temperaturabhängigkeit des Paramagnetismus nach dem Curie-Gesetz und ausserdem die bei der Curie-Temperatur stattfindende Umwandlung des Ferromagnetismus zum Paramagnetismus. [BROCKHAUS 1998]

Paul Langevin (* 1872, † 1946) stellt 1905 die erste atomare Theorie des Paramagnetismus und Diamagnetismus auf. Pierre Weiss (* 1865, † 1940) postulierte die nach ihm benannten Weiss'schen-Bezirke. Dies sind kleinste Bereiche innerhalb eines ferro- oder ferrimagnetischen Stoffs, die ohne Einwirkung eines äusseren Magnetfelds bis zur Sättigung homogen magnetisiert sind. [BROCKHAUS 1998]



Abb. 2.15 Paul Langevin

2.2 Physikalische Grundlagen des Magnetismus

Bevor auf die Ursachen des Magnetismus eingegangen werden kann, sollen die Auswirkungen des Magnetismus beschrieben werden. Dazu lassen sich im Vergleich mit der Elektrostatik Analogien, aber auch Unterschiede aufzeigen. Für die gesamte Abhandlung über die physikalischen Grundlagen wird auf die Standardwerke [TIPLER/MOSCA 2009], [KNELLER 1962], [HEPTNER/STROPPE 1972] und [LEUCHTMANN 2005] zurückgegriffen.

2.2.1 Auswirkungen des Magnetismus

In der Elektrostatik gibt es positive und negative Ladungen. In einem ungeladenen Körper treten zunächst beide Ladungen in gleicher Menge auf. Es ist nun möglich, die Ladungen aufzutrennen und voneinander zu isolieren. Man erhält dann jeweils einen isolierten Pluspol und einen isolierten Minuspol, also zwei elektrische Monopole. Eine solche Auftrennung ist im Magnetismus nicht möglich. Ein Magnet besitzt immer einen Nordpol und einen Südpol. Teilt man den Magnet nun in zwei Teile, erhält man nicht etwa einen isolierten Nordpol und einen isolierten Südpol. Vielmehr bilden sich an der Bruchstelle neue Pole aus und man hat nun zwei Magnete, wobei jeder seinen eigenen Nordpol und Südpol besitzt. Anstelle eines Dipols hat man nun zwei Dipole. Magnetische Monopole gibt es nicht. Auch wenn deren Existenz theoretisch möglich wäre, konnte bisher kein magnetischer Monopol beobachtet werden.

Während elektrische Feldlinien von positiven Ladungen zu negativen Ladungen verlaufen, also im jeweiligen Pol Start und Ende finden, enden die magnetischen Feldlinien nicht an den Polen, sondern laufen im Magnet weiter. Magnetische Feldlinien sind also grundsätzlich in sich geschlossen. Wie in der Elektrostatik stoßen sich auch beim Magnetismus gleichnamige Pole ab, während sich ungleichnamige Pole gegenseitig anziehen. Die Abstandsgesetze beider Phänomene lauten analog.

Ebenso wie elektrische Felder \vec{E} besitzen auch magnetische Felder \vec{B} sowohl Ausrichtung und Intensität. Es sind also vektorielle Größen.

2.2.2 Quellen des Magnetfelds

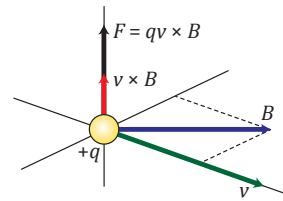
Es existieren Wechselwirkungen zwischen Magnetismus und Elektrizität. So übt ein Magnetfeld \vec{B} auf eine mit Geschwindigkeit \vec{v} bewegte Ladung q eine Kraft

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

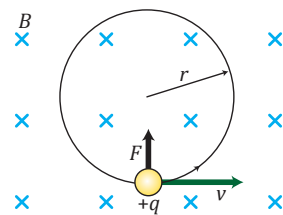
aus (Abb. 2.16a)). Wenn Feldvektor und Geschwindigkeitsvektor parallel zueinander stehen, wirkt keine Kraft. Wenn die Vektoren senkrecht zueinander sind, ist die Kraftwirkung maximal. Ein bewegtes geladenes Teilchen erfährt durch den Kraftvektor eine stetige Richtungsänderung und bewegt sich dadurch nicht mehr geradlinig, sondern beschreibt eine Kreisbahn (Abb. 2.16b)). Der Radius r dieser Kreisbahn kann durch Gleichsetzen der magnetischen Kraft mit der Zentripetalkraft berechnet werden. Der Radius ist damit zusätzlich abhängig von der Masse m des geladenen Teilchens:

$$r = \frac{m v}{q B} \quad (2.2)$$

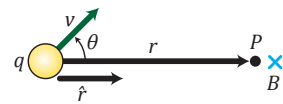
Ein Magnetfeld übt also eine Kraftwirkung auf eine bewegte elektrische Ladung aus. Im Umkehrschluss kann eine bewegte elektrische Ladung ebenso ein Magnetfeld erzeugen. Folgende Gleichung beschreibt das Magnetfeld im Punkt



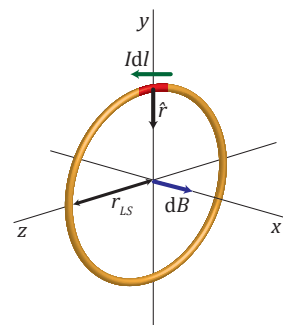
a) Auf eine elektrische Ladung, die im Magnetfeld bewegt wird, wirkt eine Kraft. Die Kraft wirkt senkrecht zum Magnetfeld und zur Geschwindigkeit der Ladung.



b) Die kontinuierliche Kraft auf eine bewegte elektrische Ladung im Magnetfeld führt dazu, dass sich diese kreisförmig bewegt.



c) Ebenso erzeugt eine bewegte elektrische Ladung ein Magnetfeld, hier allgemein dargestellt.



d) Eine Leiterschleife erzeugt in ihrem Zentrum einen magnetischen Dipol.

Abb. 2.16 Quellen des Magnetismus, nach [TIPLER/MOSCA 2009]

P , welches durch eine bewegte Ladung erzeugt wird (Abb. 2.16c)). Dabei ist \vec{r} der Richtungsvektor von der Ladung zu Punkt P :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.3)$$

Experimentell kann dieser Effekt einfach anhand einer Leiterschleife gezeigt werden, durch die ein Strom I fließt (Abb. 2.16d)). Im Mittelpunkt der Leiterschleife bildet sich folgendes Magnetfeld aus:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 r_{LS}} \quad (2.4)$$

Eine Spule nutzt diesen Effekt gleich mehrfach aus, indem ein Leiter über mehrere Windungen um einen Spulenkern geführt wird. Je mehr Windungen, desto stärker ist das Magnetfeld, welches sich ausbildet.

2.2.3 Atomistische Deutung des Magnetismus

Bahnmoment

In Kapitel 2.2.2 wurde anhand eines makroskopischen Beispiels, nämlich anhand einer Leiterschleife, gezeigt, wie man mithilfe eines Kreisstromes ein Magnetfeld erzeugen kann. Durch das Bohr'sche Atommodell kann man diesen Zusammenhang auch auf atomarer Ebene beobachten: So bewegen sich im Bohr'schen Atommodell die Elektronen auf stabilen Bahnen um den Atomkern. Die negativ geladenen Elektronen kann man dabei als Kreisströme betrachten. Dabei erzeugt jedes einzelne Elektron mit seinem Bahndrehimpuls \vec{L} ein magnetisches Bahnmoment:

$$\vec{\mu}_L = -\mu_{\text{Bohr}} \frac{\vec{L}}{\hbar} \quad (2.5)$$

Dabei berechnet sich das Bohr'sche Magneton μ_{Bohr} über:

$$\mu_{\text{Bohr}} = \frac{e \hbar}{2 m_e} \quad (2.6)$$

Das reduzierte Planck'sche Wirkungsquantum \hbar kann dabei alternativ in Abhängigkeit des Planck'schen Wirkungsquantums h ausgedrückt werden:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (2.7)$$

Spinmoment

Man betrachte in der Modellvorstellung ein kugelförmiges Elektron mit Radius r_e und Gesamtladung e . Die Ladung stelle man sich über das gesamte Volumen des Elektrons verteilt vor. Wenn nun das Elektron um seine eigene Achse rotiert, kann man auch die fiktiven einzelnen Ladungsträger innerhalb des Elektrons als einen Kreisstrom betrachten, der um die Achse des Elektrons fließt. Das dabei entstehende magnetische Spinmoment ist abhängig vom Spindrehimpuls \vec{S} und berechnet sich als:

$$\vec{\mu}_S = -2 \mu_{\text{Bohr}} \frac{\vec{S}}{\hbar} \quad (2.8)$$

In Versuchen konnte gezeigt werden, dass das Spinmoment eines Elektrons ein etwa doppelt so grosses Magnetfeld erzeugt wie das Bahnmoment des gleichen Elektrons.

2.2.4 Arten des Magnetismus

Die Magnetisierung \vec{M} eines Körpers ist definiert als das magnetische Moment $\vec{\mu}$ pro Volumeneinheit:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{\mu}}{dV} \quad (2.9)$$

In speziellen Fällen kann angenommen werden, dass die Magnetisierung sich proportional zu einem äusseren Feld mit der magnetischen Feldstärke \vec{H} verhält. Dies ist zum Beispiel bei weichem Eisen und kleinen Feldstärken der Fall. Die dimensionslose magnetische Suszeptibilität χ_m ist dabei die materialabhängige Konstante:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.10)$$

Die magnetische Flussdichte \vec{B} ist allgemein

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.11)$$

und im Spezialfall

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (2.12)$$

$$= \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2.13)$$

$$= \mu \vec{H} \quad (2.14)$$

wobei μ_0 die Permeabilität des Vakuums ist, μ_r die relative Permeabilität und μ die Permeabilität des entsprechenden Mediums.

Dabei hat die magnetische Flussdichte \vec{B} die Einheit T (Tesla). Die magnetische Feldstärke \vec{H} und die Magnetisierung \vec{M} haben die Einheit A/m (Ampere pro Meter).

Grundsätzlich sind alle Stoffe magnetisierbar. Allerdings gibt es, was die Art der Magnetisierung angeht, sehr unterschiedliches Verhalten. Diese Arten der Elementarmagnetisierung kann in mehrere Gruppen aufgeteilt werden. Faraday wählte eine Einteilung der Stoffe in diamagnetische und paramagnetische Stoffe. Stoffe verhalten sich diamagnetisch, wenn sie ihre Energie in einem Magnetfeld erniedrigen ($\chi_m < 0$). Dies zeigt sich experimentell dadurch, dass sie im Magnetfeld eine Kraftwirkung in Richtung niedrigerer Feldstärken erfahren, also von einem Magnet abgestossen werden. Paramagnetische Stoffe dagegen erhöhen ihre Energie in einem Magnetfeld ($\chi_m > 0$ und erfahren dementsprechend eine Kraft in Richtung höherer Feldstärken, werden also von einem Magnet angezogen.

Grundsätzlich können alle Stoffe in diese beiden Gruppen eingeordnet werden. Da es innerhalb der paramagnetischen Stoffe noch weitere relevante

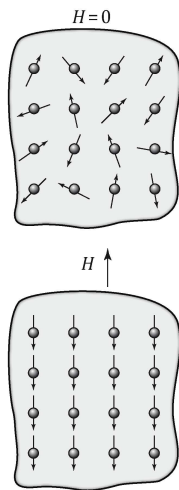


Abb. 2.17 Diamagnetismus, aus [WOLF 2012]

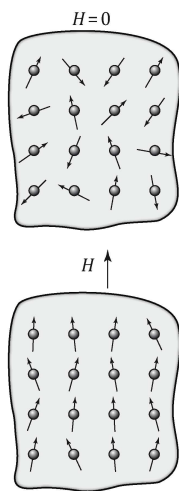


Abb. 2.18 Paramagnetismus, aus [WOLF 2012]

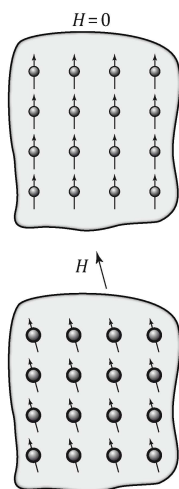


Abb. 2.19 Ferromagnetismus, aus [WOLF 2012]

Effekte gibt, werden innerhalb dieser Gruppe noch weitere Gruppen definiert, nämlich ferromagnetische, antiferromagnetische und ferrimagnetische Stoffe aufgeteilt. Alle fünf Gruppen werden im Folgenden genauer beschrieben.

Diamagnetismus

Zu den diamagnetischen Stoffen (Abb. 2.17) zählen sämtliche Stoffe, bei denen alle vorhandenen Elektronenschalen abgeschlossen sind. Dies sind grundsätzlich alle Edelgase und Salze. Auch Wasser verhält sich diamagnetisch, wenn auch nur relativ schwach. Starkes diamagnetisches Verhalten tritt bei Graphit auf. Nimmt man alle Elektronen einer abgeschlossenen Schale zusammen, so heben sämtliche Spinnmomente und Bahnmomente einander auf. Bringt man ein magnetisches Feld auf derartige Stoffe auf, so wirken die magnetischen Momente dem Feld entgegen.

Paramagnetismus

Zu den paramagnetischen Stoffen (Abb. 2.18) zählen im Gegensatz dazu solche, die wenigstens eine unabgeschlossene Schale aufweisen. Auch im Kristallverband müssen noch unabgeschlossene Schalen vorhanden sein. Spinnmomente von Valenzelektronen dürfen sich nicht paarweise absättigen.

Bei Metallen treten vier Effekte auf: Wie bereits beschrieben rufen abgeschlossene Schalen einen Diamagnetismus hervor und unabgeschlossene Schalen einen starken Paramagnetismus. Dabei ist der Paramagnetismus der gebundenen Elektronen temperaturabhängig. Zusätzlich haben Metalle Leitungselektronen, die sich auf beide Weisen verhalten können: Durch ihre ungeordneten Bahnen verhält sich das Metall diamagnetisch, durch die Spins der Leitungselektronen wird ein Paramagnetismus verursacht. Dieser paramagnetische Effekt ist nicht temperaturabhängig. Je nachdem, welcher Effekt überwiegt, verhält sich das Metall mehr oder weniger stark diamagnetisch bzw. paramagnetisch.

Ferromagnetismus

In vielen Metallen sind die Wechselwirkungen der magnetischen Elementarmagnete derart stark, dass es die Tendenz gibt, sich parallel zum Nachbarn auszurichten. Das führt dazu, dass auch ohne äusseres Magnetfeld in makroskopischen Kristallbereichen eine homogene Magnetisierung entsteht. Diese spontane Magnetisierung ist die zentrale Eigenschaft des Ferromagnetismus (Abb. 2.19). Sie kann sich ausschliesslich in Kristallen ausbilden.

Der Effekt ist temperaturabhängig und verschwindet, sobald die thermische Energie gleich der potentiellen Energie der atomaren magnetischen Momente ist. Dieser Temperaturpunkt wird Curie-Temperatur genannt und ist materialspezifisch. Oberhalb der Curie-Temperatur verhält sich der Stoff paramagnetisch.

Antiferromagnetismus

Während die magnetischen Momente beim Ferromagnetismus die Tendenz haben, sich parallel zum Nachbarn auszurichten, findet beim Antiferromagnetismus (Abb. 2.20) eine antiparallele Ausrichtung statt. Dies wird dadurch begründet, dass innerhalb der Kristallstruktur zwei Untergitter existieren. Bringt man ein externes Feld auf, so werden die magnetischen Momente aus ihrer ursprünglichen Lage in die Richtung des äusseren Feldes ausgelenkt. Die Magnetisierung findet nur reversibel statt. Eine Temperaturabhängigkeit gibt es hier ebenso wie beim Ferromagnetismus, wenn auch in anderer Form.

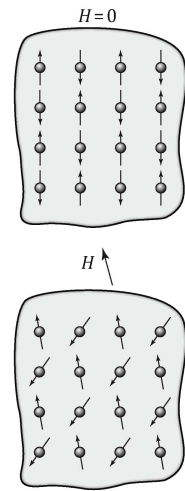


Abb. 2.20 Antiferromagnetismus, aus [WOLF 2012]

Ferrimagnetismus

Ebenso wie der Antiferromagnetismus gibt es auch im Ferrimagnetismus (Abb. 2.21) zwei Untergitter, deren magnetische Momente einander entgegengerichtet sind. Anders als beim Antiferromagnetismus sind diese magnetischen Momente jedoch nicht gleich stark, weshalb sich die magnetischen Momente im einen Untergitter einem äusseren Feld stärker anpassen als die magnetischen Momente des anderen Untergitters.

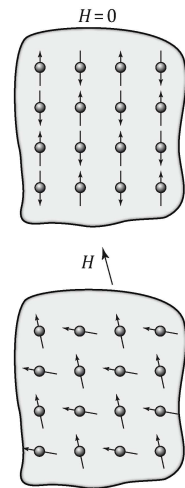


Abb. 2.21 Ferrimagnetismus, aus [WOLF 2012]

Abgrenzung

Da für diese Arbeit nur die Eigenschaften des Betonstahls massgebend sind, beschäftigt sich dieses Kapitel im Folgenden nur mit den Eigenschaften des Ferromagnetismus. Alle anderen relevanten Materialien wie z.B. Beton, Luft, Wasser, Kunststoffe sind schwach diamagnetisch bzw. paramagnetisch und beeinflussen die Messungen nicht. Lediglich andere ferromagnetische Materialien können als Störquellen auftreten.

2.2.5 Ferromagnetische Hysterese

Die Magnetisierung von ferromagnetischen Materialien ist durch eine deutliche Hysterese (Abb. 2.22) charakterisiert. Die Hysteresekurve, auch Magnetisierungsschleife genannt, zeigt auf, wie sich die Magnetisierung M bzw. das Magnetfeld B in Abhängigkeit eines äusseren Magnetfeldes H verhält. Das Verhalten ist dabei pfadabhängig. Je nachdem, wie das Material bereits magnetisiert ist, reagiert es anders auf ein äusseres Magnetfeld. Um eine exakte Voraussage treffen zu können, welche Magnetisierung ein Gegenstand in einem definierten Magnetfeld erfahren würde, müsste man wissen, welche Magnetisierung aktuell vorhanden ist. Da die Magnetisierungsgeschichte in der Praxis selten bekannt ist, muss man einen bekannten Zustand selbst herbeiführen, indem man die bisherige Magnetisierungsgeschichte einfach überschreibt.

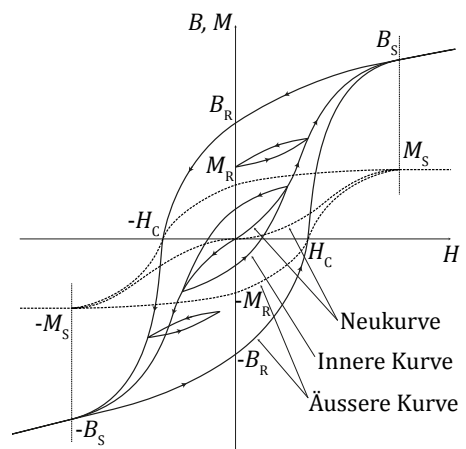


Abb. 2.22 Hysteresekurven, nach [CULLITY/GRAHAM 2009] und [KNELLER 1962]

Es gibt nicht nur eine Hysteresekurve, sondern eine unendliche Anzahl an Schleifen, die bei einer Magnetisierung durchfahren werden können. Alle diese möglichen Schleifen sind durch die äussere Hysteresekurve begrenzt. Eine besondere Kurve ist die sogenannte Neukurve. Diese beginnt im Ursprung des Koordinatensystems und kommt zur Anwendung, wenn das Material bisher keine Magnetisierung erfahren hat. Erhöht man nun die Feldstärke H kontinuierlich, so wird die Magnetisierung M zunächst flach ansteigen, anschliessend steil und gegen Ende erneut flach, bis die Sättigung M_S erreicht wird. Die Sättigung kann nur innerhalb eines bestehenden Feldes aufrechterhalten werden. Senkt man die Feldstärke H wieder auf null, so sinkt auch die Magnetisierung wieder. Jedoch fällt die Magnetisierung nicht auf null zurück, sondern lediglich bis zur Remanenz M_R . Der sogenannte reversible Teil der Magnetisierung ist an dieser Stelle wieder verloren gegangen. Es bleibt der irreversible Teil der Magnetisierung zurück. Irreversibel heisst jedoch nicht, dass diese Magnetisierung nicht doch noch irgendwie rückgängig gemacht werden könnte. So kann man das magnetische Feld H in den negativen Bereich fahren, bis zur Koerzitivfeldstärke H_C . Die Koerzitivfeldstärke ist als die Feldstärke definiert, die nötig ist, um die vorhandene Magnetisierung wieder rückgängig zu machen. In der Praxis ist es jedoch sehr aufwändig, einen Gegenstand auf diese Weise präzise zu entmagnetisieren. Man kann nun die Feldstärke H weiter in den negativen Bereich fahren, bis man erneut eine Sättigung erreicht. Die Hysteresekurve ist symmetrisch. Das Magnetfeld B lässt sich im Gegensatz zur Magnetisierung M beliebig steigern.

2.2.6 Temperaturabhängigkeit

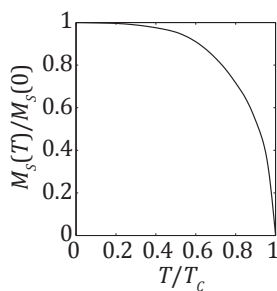


Abb. 2.23 Temperaturabhängigkeit der spontanen Magnetisierung, nach [KNELLER 1962]

Die spontane Magnetisierung eines Ferromagneten ist temperaturabhängig. Der Begriff spontane Magnetisierung bezeichnet dabei wie bereits beschrieben die spontane Bildung von makroskopischen Kristallbereichen mit homogener Magnetisierung. Aber nicht nur die Bildung solcher Bereiche ist davon betroffen, sondern auch deren Erhaltung.

Am absoluten Nullpunkt ist die spontane Magnetisierung maximal. Man könnte diesen Grad der Magnetisierung zwar auch bei einer beliebigen Temperatur durch ein sehr grosses äusseres Magnetfeld annähernd erreichen, sobald man das äussere Feld aber deaktiviert, würde auch wenigstens ein Teil der Magnetisierung wieder verschwinden. Je höher die Temperatur ist, desto schwächer ist die spontane Magnetisierung. Bei der Curie-Temperatur ist dann der Punkt erreicht, an dem gar keine spontane Magnetisierung mehr auftritt. Oberhalb dieser Temperatur treten keine ferromagnetischen Effekte mehr auf, sondern lediglich paramagnetische. Die Temperaturabhängigkeit wird durch Abbildung 2.23 dargestellt. Dabei beschreibt T/T_c das Verhältnis zwischen der Probestemperatur und der materialabhängigen Curie-Temperatur. $M_s(T)/M_s(0)$ ist das Verhältnis zwischen der spontanen Magnetisierung bei der Probestemperatur T und der maximal möglichen spontanen

Magnetisierung.

Die Curie-Temperatur von reinem Eisen liegt bei 770°C bzw. 1043 K. Je nach Beimischung anderer Elemente kann die Temperatur stark abweichen, jedoch nicht so stark, dass es für die Anwendung im Labor oder auf der Baustelle relevant wäre. Für diese Arbeit kann der Einfluss der Temperatur vernachlässigt werden, da man sich bezüglich T/T_C deutlich unter 0,4 befindet und somit in einem Bereich mit nur geringer Temperaturabhängigkeit.

2.2.7 Entmagnetisierungsfaktor

Der Entmagnetisierungsfaktor ist in erster Linie eine geometrische Grösse. Der Effekt kann wie folgt veranschaulicht werden: In einem homogenen äusseren Magnetfeld H befindet sich eine Probe, die durch das äussere Magnetfeld magnetisiert wird. (Abb. 2.24) Von den Polen der magnetisierten Probe gehen nun Feldlinien aus, die dem äusseren Magnetfeld entgegengerichtet sind. Dementsprechend wird die Magnetisierung der Probe erschwert.

Nur bei einem idealen Ellipsoid wäre dieses entgegengesetzte Feld homogen und dem äusseren Feld exakt entgegengerichtet. Der Entmagnetisierungsfaktor ist dann über die gesamte Probe konstant und sogar analytisch bestimmbar. Für andere Formen lässt sich der Entmagnetisierungsfaktor lediglich simulieren oder messen und gilt nur annähernd für die gesamte Probe.

Der Entmagnetisierungsfaktor $N = N_g + N_i$ setzt sich zusammen aus dem geometrischen Entmagnetisierungsfaktor N_g , wie oben beschrieben, und ausserdem aus einem Entmagnetisierungsfaktor N_i , der durch innere Materialinhomogenitäten verursacht wird. Letzterer kann natürlich im Voraus nicht bestimmt werden. Im Folgenden geht es nur um den geometrischen Faktor N_g , da dieser aus der Geometrie eindeutig bestimmbar ist.

Während der Zusammenhang zwischen Magnetisierung und äusserem Magnetfeld im Allgemeinen durch

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.15)$$

gegeben ist, wird die Gleichung unter Berücksichtigung der Entmagnetisierung angepasst als:

$$\vec{M} = \chi_m (\vec{H} - N \vec{M}) \quad (2.16)$$

Der Ausdruck konvergiert nach einigen Iterationen zur tatsächlichen Magnetisierung.

Bei zylinderförmigen Körpern hängt der Entmagnetisierungsfaktor vor allem vom Dimensionsverhältnis $p = l/d$ ab. Bei besonders schlanken Stäben bleibt der Faktor sehr klein. Im Extremfall des unendlich langen Stabes ist der Faktor sogar $N_g \approx 0$, während er bei einem unendlich kurzen Stab bis zu $N_g = 4\pi$ beträgt.

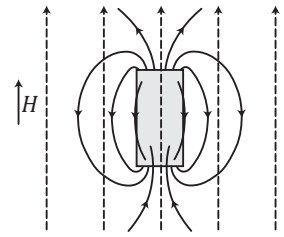


Abb. 2.24 Prinzip des Entmagnetisierungsfaktors, nach [HEPTNER/STROPPE 1972]

2.2.8 Weiss'sche Bezirke und Bloch-Wände

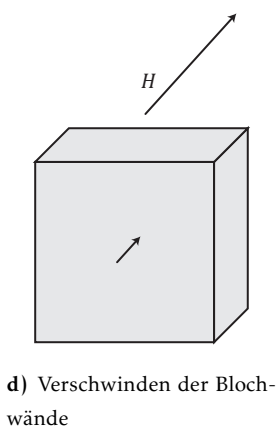
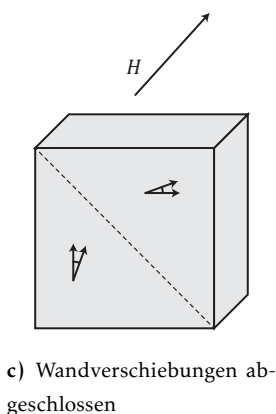
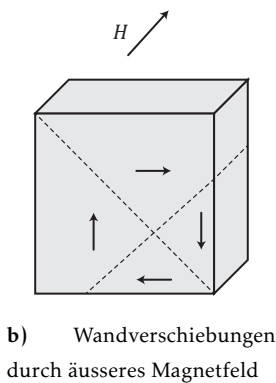
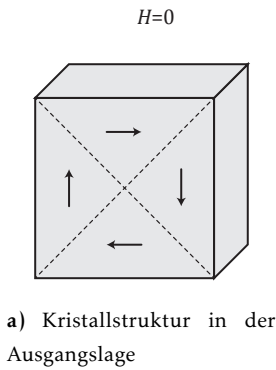


Abb. 2.25 Magnetisierungsprozess längs der Neukurve, nach [KNELLER 1962]

Die Kristallstruktur eines Ferromagneten ist unterteilt in Bereiche mit homogener Magnetisierung. Die einzelnen Bereiche sind selbst dann homogen magnetisiert, wenn die gesamte Probe nach aussen hin neutral ist. Diese Bereiche werden nach [WEISS 1907] Weiss'sche Bezirke genannt und sind mit sogenannten Bloch-Wänden [BLOCH 1932] voneinander abgetrennt. Im Folgenden wird anhand von Abbildung 2.25 die Magnetisierung eines Kristalls mit vier Weiss'schen Bezirken entlang der Neukurve beschrieben:

Gegeben ist ein Kristall mit vier Weiss'schen Bezirken (Abb. 2.25a)). Von aussen wirkt noch kein Feld. Alle Bezirke haben das gleiche Volumen, aber unterschiedliche magnetische Ausrichtungen. Die magnetischen Momente heben einander auf. Nach aussen hin ist der Kristall neutral.

Es wird ein äusseres Magnetfeld aufgebracht (Abb. 2.25b)). Die Weiss'schen Bezirke, deren magnetische Ausrichtung am ehesten dem äusseren Feld entspricht, wachsen zulasten von den Bezirken, deren Ausrichtung dem äusseren Feld entgegengesetzt ist. Es kommt zu Verschiebungen der Bloch-Wände.

Bei einer weiteren Steigerung des äusseren Feldes (Abb. 2.25c)) werden die Wandverschiebungen abgeschlossen. Die verbleibenden Bezirke haben die gleiche potentielle Energie, zeigen aber nicht exakt in die äussere Feldrichtung. Weitere Wandverschiebungen treten nicht auf, da die potentielle Energie dadurch nicht mehr weiter gesenkt werden kann.

Erst durch noch weitere Steigerung des äusseren Feldes (Abb. 2.25d)) lassen sich Drehprozesse erzeugen, wodurch sich die einzelnen Weiss'schen Bezirke erst wirklich der Ausrichtung des äusseren Feldes anpassen. Diese Drehprozesse benötigen wesentlich mehr Energie, als die Wandverschiebungen. Mit der Angleichung benachbarter Bezirke verschwinden auch die Bloch-Wände.

2.2.9 Barkhausen-Sprünge

Den ersten Hinweis auf die Art dieser Kristallstruktur fand [BARKHAUSEN 1919], indem er mithilfe eines akustischen Verfahrens bemerkte, dass die Magnetisierung von Eisen teilweise unstetig verläuft. Seine Versuchsanordnung bestand aus einem Telefon, das mithilfe eines Verstärkers die Spannungen hörbar machte, die ein Eisenstück während seiner Magnetisierung in einer Spule verursachte. Er deutete die Geräusche korrekterweise so, dass die Molekularmagnete sich beim Ummagnetisieren sprunghaft in ihre neue Lage bewegen. Dass es zusätzlich zu den kontinuierlichen Prozessen bei der Magnetisierung auch diskontinuierliche gibt, war damals nicht bekannt.

Diese Diskontinuitäten in der Magnetisierungskurve, auch Barkhausen-Sprünge genannt, sind schematisch in Abbildung 2.26 dargestellt.

2.3 Neuronale Netze

Es existiert bisher keine allgemein anerkannte Definition für neuronale Netze in der Literatur. Vielmehr ist das neuronale Netz ein Oberbegriff für eine Vielzahl unterschiedlicher Netztypen. Allen neuronalen Netzen ist jedoch gemein, dass sie Informationen enthalten, verarbeiten und ausgeben. Je nach Netzarchitektur kann sich ein Netz während der Verarbeitung umstrukturieren. Historisch waren das Gehirn und biologische Neuronen ein Vorbild für die Entwicklung mathematischer neuronaler Netze. Gerade bei Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen sind die Ähnlichkeiten allerdings verschwindend gering. Es handelt sich lediglich um ein mathematisches Konzept eines Assoziativspeichers. [REY/WENDER 2011]

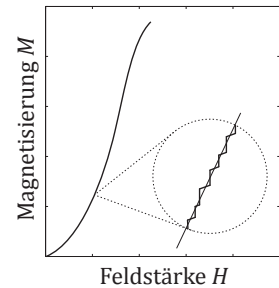


Abb. 2.26 Barkhausen-Sprünge in der Magnetisierungskurve, nach [KNELLER 1962]

2.3.1 Bestandteile neuronaler Netze

Der Grundbestandteil eines neuronalen Netzes sind die Neuronen als dessen Recheneinheiten. Die einzelnen Neuronen sind durch gerichtete, gewichtete Verbindungen miteinander verknüpft. Die Topologie bestimmt die Anordnung der Neuronen im Netz. In dieser Arbeit wird dazu auf das gängige Konzept des FeedForward-Netzes zurückgegriffen. [KRIESEL 2007]

2.3.2 Topologie des FeedForward-Netzes

In einem FeedForward-Netz werden die Neuronen in Schichten eingeteilt: Über die Eingabeschicht werden dem Netz Daten zur Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Das Ergebnis der Verarbeitung kann über die Ausgabeschicht wiederum abgerufen werden. Zwischen Ein- und Ausgabeschicht können null oder beliebig viele versteckte Verarbeitungsschichten angeordnet werden. Die Anzahl der Neuronen darf von Schicht zu Schicht variieren. [KRIESEL 2007]

Von jedem Neuron dürfen nur Verbindungen zu Neuronen der nachfolgenden Schicht ausgehen. Ist jedes Neuron mit allen Neuronen der nachfolgenden Schicht verbunden, nennt man die Schichten vollverknüpft. Sämtliche Verbindungen zwischen zwei Schichten bilden eine Gewichtsschicht. [KRIESEL 2007]

2.3.3 Informationsverarbeitung innerhalb des Neurons

Innerhalb eines Neurons wird die Information über drei Funktionen verarbeitet: Die Propagierungsfunktion, die Aktivierungsfunktion und die Ausgabefunktion. [KRIESEL 2007]

Die Aufgabe der Propagierungsfunktion ist es, die Eingabewerte der Neuronen der vorhergehenden Schicht zu sammeln und zusammenzufassen. Dies geschieht in der Regel über eine gewichtete Summe. [KRIESEL 2007]

Das Ergebnis der Propagierungsfunktion dient als Eingabeparameter für die Aktivierungsfunktion. Eine übliche Aktivierungsfunktion ist die binäre Schwellenwertfunktion, auch Heaviside-Funktion genannt. Diese Funktion

definiert einen Schwellenwert, der entweder erreicht oder nicht erreicht wird. Eine alternative stellt die logistische Funktion, auch Fermi-Funktion genannt, dar. Diese Funktion stellt quasi eine abgerundete Schwellenwertfunktion dar und ist in jedem Punkt differenzierbar, eine Eigenschaft, die für einige Lernverfahren eine Voraussetzung ist. [KRIESEL 2007]

Das Ergebnis der Aktivierungsfunktion wird durch die Ausgabefunktion an die Neuronen des folgenden Layers weitergereicht. Als Ausgabefunktion wird in die Regel die Identität gewählt. [KRIESEL 2007]

2.3.4 Lernprozess des Netzes

Ziel ist es, dass sich das neuronale Netz durch Training mit einer Menge von Trainingsbeispielen vertraut macht. Bei den Trainingsbeispielen sind zu den Eingabewerten die jeweiligen Ausgabewerte bekannt. Während des Lernprozesses werden die Verbindungsgewichte zwischen den Neuronen iterativ angepasst, sodass der Unterschied zwischen der tatsächlichen und der gewünschten Netzausgabe für alle Trainingsbeispiele minimiert wird. Sofern die Netzarchitektur und der gewählte Lern-Algorithmus zweckmässig sind, findet eine Generalisierung im Netz statt, die es erlaubt, bisher unbekannte Probleme der gleichen Klasse zu lösen. [KRIESEL 2007]

3 Stand der Forschung

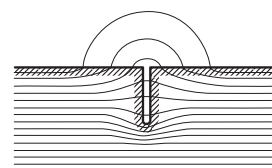
Die Werkstoffprüfung mithilfe von Effekten des Magnetismus gilt als eine der ältesten zerstörungsfreien Prüfmethoden. Erste Anwendungen waren 1868 die Untersuchung von Gewehrläufen und 1879 die Überprüfung von Schienen mittels Magnetkompass. Da die theoretischen Grundlagen grösstenteils fehlten, waren präzise Deutungen oft nicht möglich. Allgemein wurde die Methode 1922 durch W. E. Hooke durch ein Patent zur Nutzbarmachung des magnetischen Streufeldes eingeführt. Es folgten systematische Untersuchungen in den USA und in Deutschland mit Schwerpunkt Magnetpulverprüfung. [HEPTNER/STROPPE 1972]

3.1 Das magnetische Streufeld

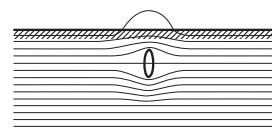
In einem magnetisierten Körper, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, verlaufen die Feldlinien annähernd parallel. An einer Störstelle, wie beispielsweise einem Riss oder einem Materialfehler, wo sich die magnetische Permeabilität massgeblich vom umgebenden Werkstoff unterscheidet, gibt es nach [HEPTNER/STROPPE 1972] drei Wege, über die der magnetische Fluss fließen kann:

1. Der grösste Teil der Feldlinien wird nach wie vor durch den Restquerschnitt verlaufen, da dieser die grösste Permeabilität besitzt. Die Feldlinien verdichten sich im Restquerschnitt.
2. Ein weiterer Teil wird seinen Weg durch die Fehlstelle fortsetzen. Die magnetische Flussdichte ist jedoch materialbedingt bedeutend kleiner als im Restquerschnitt.
3. Der kleinste Teil des magnetischen Flusses tritt schon vor der Fehlstelle aus dem Körper aus und tritt erst nach der Fehlstelle wieder in den Körper ein. Dieser Fluss wird Streufluss genannt, das resultierende Feld ist das magnetische Streufeld. Auch wenn der Fluss vergleichsweise klein ist, eignet er sich aufgrund seiner Ausbreitung doch zur Ortung von Fehlstellen.

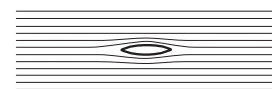
Wie ebenfalls aus Abbildung 3.1 ersichtlich ist, ist die Ausprägung des Streufeldes stark abhängig von der Geometrie. So wird sich nach [HEPTNER/STROPPE 1972] ein Streufeld nur dann ausbilden können, wenn Fehler und Feldlinien einen Winkel von 45 bis 90° bilden. Bei spitzen Winkeln oder sogar



a) an einem Oberflächenfehler



b) an einem Fehler nahe der Oberfläche



c) an einem Innenfehler in Feldrichtung

Abb. 3.1 Magnetisches Streufeld, nach [HEPTNER/STROPPE 1972]

gleicher Richtung von Fehler und Feldlinien wird der Fehler ohne Streufeld durch den Restquerschnitt umflossen. Ebenso lassen sich Oberflächenfehler besser feststellen als innere Fehler.

3.2 Detektion von Spannstahlbrüchen

3.2.1 F. N. Kusenberger und J. R. Barton

In den USA haben [KUSENBERGER/BARTON 1981] in den 70er und 80er Jahren einige Untersuchungen bezüglich Schädigungen an Spannstählen durchgeführt. Als Problemstellung wurden die verschiedenen Schadensbilder des Spannstahls, wie zum Beispiel Materialfehler, Korrosion, Verformungsbrüche und Ermüdungsbrüche definiert. Die Autoren haben in einer Literaturrecherche den Stand der Technik von 15 zerstörungsfreien Prüfmethoden evaluiert, von denen keine zum damaligen Stand den Anforderungen genügte. Am ehesten waren magnetische Verfahren erfolgversprechend, die dann auch von den Autoren im Labor weiterentwickelt wurden.

Im Zuge der Weiterentwicklung wurde eine magnetische Messeinrichtung entwickelt, die aus einem Elektromagnet und einem Hall-Sensor bestand. Untersucht wurden diverse Anordnungen und nachgebildete Schadensbilder. Die resultierenden Messkurven werden dargestellt und beschrieben, jedoch nicht mithilfe des physikalischen Hintergrundes gedeutet.

3.2.2 Horst Scheel und Bernd Hillemeier

Die Dissertation von [SCHEEL 1997] war wegbereitend für den Einsatz der magnetischen Streufeldmethode im Bauwesen in Deutschland. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Methode entwickelt, mit der sich Spannkabel bis in eine Tiefe von 30 cm magnetisieren lassen. Die schlaffe Bewehrung war nicht von Interesse. Vielmehr wurde die Magnetisierungseinheit so konstruiert, dass die schlaffe Bewehrung bei der Überfahrt wieder weitgehend entmagnetisiert wird. Dabei machte sich Scheel zunutze, dass die Koerzitivfeldstärke von Betonstahl wesentlich kleiner ist, als die der Spannstähle. Durch ein Feld in umgekehrter Magnetisierungsrichtung konnte also die Magnetisierung der schlaffen Bewehrung teilweise rückgängig gemacht werden, ohne den Spannstahl wieder zu entmagnetisieren.

Magnetisiert wurde mit einem Joch mit zwei Spulen. Gemessen wurde ausserhalb des Einflussbereichs des Magnets. Es wurde also das indirekte, remanente Feld gemessen. Die Messung der Bruchsignale erfolgte auch unter Variation diverser Grössen, die Einfluss auf die Signalbreite und Signalstärke hatten, wie beispielsweise der Magnetisierungsgeschichte, der Betondeckung oder der Lage der Bruchstelle im Spannglied. In der Breite wurde mit zehn Hallsonden gemessen, wobei fünf axial (in Richtung der Bewehrungsstäbe) und die anderen fünf transversal (orthogonal zur

Betonoberfläche) ausgerichtet waren. Dabei konnten Gesetzmässigkeiten für Bruchsignale festgestellt werden, die in der weiteren Ausarbeitung von Scheel auch physikalisch begründet wurden.

Des weiteren untersuchte Scheel auch die magnetischen und magnetoelastischen Eigenschaften unterschiedlicher Spannstähle. Dabei zeigten sich keine relevanten Unterschiede, solange keine Spannung aufgebracht wurde. Bei aufgebrachter Spannung zeigten selbst Stähle gleicher Festigkeit unterschiedliche magnetische Eigenschaften, wenn sie von unterschiedlichen Herstellern kamen.

Im Gesamtergebnis der Arbeit konnte ein Messverfahren entwickelt werden, das eine Ortung von Spannstahlbrüchen und eine Abschätzung des Schädigungsgrads ermöglicht. Der Artikel [SCHEEL/HILLEMEIER 1997] fasst den Messablauf und die Auswertung im praktischen Einsatz zusammen. In [HILLEMEIER/SCHEEL 2002] und [SCHEEL/HILLEMEIER 2003] wird die Methode zunächst qualitativ mit den gängigen Verfahren verglichen und anschliessend die erfolgreiche Anwendung an einer Fabrikhallendecke beschrieben. [SCHEEL 2006], [HILLEMEIER/WALTHER 2007] und [SZIELASKO *et al.* 2006] zeigt die Anwendung der Methode in einem grösseren Massstab. Dafür wurde an der TU Berlin ein fahrbarer Magnet mit angehängtem rotierenden Sensor konstruiert, der Fahrbahnstreifen von bis zu 3,5 m Breite aufmagnetisieren und untersuchen kann. Es wird von weitergehenden praktischen Anwendungen des Verfahrens berichtet.

3.2.3 Gottfried Sawade und Hans-Joachim Krause

Wie schon [SCHEEL 1997] bemängelt hat, existiert keine kommerzielle Lösung zur Simulation von Magnetfeldern, die für eine Nachbildung der magnetischen Streufeldmethode geeignet wäre. Beispielsweise werde der Entmagnetisierungsfaktor in der gängigen Software grundsätzlich vernachlässigt. Aus diesem Grund hat [SAWADE 1999b] ein mathematisches Modell erstellt und weiterentwickelt. Mit dem Rechenmodell, welches Sawade SMFLM (Simulation Magnetic Flux Leakage Measurement) nennt, kann sowohl eine Messung im aktiven Magnetfeld, als auch eine Restfeldmessung simuliert werden. Durch eine Implementation der Hysteresekurve wird die Magnetisierungsgeschichte ab der Neukurve berücksichtigt. Da im Gegensatz zu der gängigen Software nur die ferromagnetischen Bauteile simuliert werden, ergibt sich ein entscheidender Vorteil bei der Rechenzeit. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung demonstriert werden.

Die praktische Anwendung der Simulationen zeigt sich in [SAWADE 1999a], wo Sawade auf unterschiedliche Möglichkeiten der Signalaufbereitung eingeht:

Eine Möglichkeit (ohne Zuhilfenahme von Simulationen) ist die mehrfache Messung im aktiven Feld, wobei man die Magnetisierungsstärke variiert. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass es Sawade um die Bruchdetektion in der tieferliegenden Spannbewehrung geht. Mit der Messung bei unterschiedlichen

Magnetisierungsstärken macht man sich zunutze, dass die Signale der Spannbewehrung nicht proportional zur Stärke des Magnets zunehmen. Vielmehr nehmen zunächst nur die unerwünschten Signale der schlaffen Bügelbewehrung zu, während die Signale der Spannbewehrung erst bei höheren Magnetisierungsstärken sichtbar werden. Bildet man die Differenz beider Messungen, so lassen sich die Signale der Bügel herausrechnen.

Die zweite Möglichkeit ist, aus der Messung den Bügelabstand zu entnehmen. Da aus den Simulationen die Signale einer idealen Bügelbewehrung bekannt sind, können diese nun von den Messdaten abgezogen werden. Da annähernd das Superpositionsprinzip gilt, enthalten die Messdaten nun nur noch die gewünschten Informationen über die vorgespannten Längsstäbe. Laut [SAWADE/KRAUSE 2007] ist die Superposition jedoch bei aktiven Feldmessungen deutlich problematischer als bei remanenten Feldmessungen.

Die dritte Möglichkeit ist bereits aus [SCHEEL 1997] bekannt: Aufgrund ihrer höheren Lage und ihrer geringeren Koerzitivfeldstärke lässt sich die schlaffe Bewehrung nicht nur einfacher als der Spannstahl magnetisieren, sondern auch einfacher entmagnetisieren. Durch ein nachlaufendes, schwächeres Feld, das dem eigentlichen Feld zur Magnetisierung entgegen gerichtet ist, wird die schlaffe Bewehrung weitgehend entmagnetisiert, während der Spannstahl magnetisiert bleibt.

[SAWADE/KRAUSE 2010] geht neben einer Beschreibung von Messung und Auswertung auch auf Anwendungsbeispiele ein. Die Anwendung als Wiederholungsmessung wird als besonders aussagekräftig eingeschätzt, da eine Zustandsänderung zwischen zwei Messungen sehr zuverlässig mit verhältnismässig geringem Aufwand festgestellt werden kann. Bei einer Erstmessung dagegen ist die Unterscheidung zwischen Bruchsignal und Störsignal eine anspruchsvolle Aufgabe.

3.2.4 Chol-I Pak und Bernd Hillemeier

Ähnlich wie [SAWADE 1999b] hat [PAK 2010] in seiner Dissertation Modelle zur Berechnung von Magnetfeldern entwickelt. Dabei handelt es sich sowohl um numerische, als auch um analytische Modelle von Bewehrungsstäben und dem eingesetzten Jochmagneten. Zudem beschäftigt er sich mit magnetoelastischen Effekten, das heisst mit der Spannungsabhängigkeit der magnetischen Effekte. Ziel der entwickelten Theorien ist nicht, dass man das Magnetfeld einer Bewehrungsanordnung möglichst genau berechnen kann, sondern es sollte ein mathematisches Verfahren entwickelt werden, um Störquellen aus den Messwerten herauszurechnen. Möglich sind auch Rückschlüsse aus Messungen auf Bewehrungsdurchmesser bzw. Bewehrungsüberdeckungen, wenn einer der beiden Parameter bekannt ist.

3.2.5 Andrei Walther und Bernd Hillemeier

In [WALTHER 2012] wurden zusätzlich zu [SCHEEL 1997] zwei neue Kriterien eingeführt. Neben der Bruchsignalstärke und dem Signalabstand hat Walther zusätzlich den Bruchsignalanstieg und dessen Anstiegswinkel ausgewertet. Mit diesen neuen Kriterien ist es möglich, in einem Spannstahlbündel einen Staffelbruch, also die Brüche mehrerer Litzen innerhalb kurzer Abstände, von einem Einzelbruch zu unterscheiden. Mit dieser Information lassen sich nicht nur Aussagen über den Schadensort treffen, sondern sogar über das Schadensausmass.

Für die genannten Kriterien hat Walther sowohl Messungen im remanenten, als auch im aktiven Feld durchgeführt. Die aktiven Messungen konnten bis zu einer Messtiefe von 20 cm deutlich bessere Signale als die remanenten Messungen liefern. Für tiefere Brüche waren beide Methoden in etwa gleichwertig. Würde man die Abmessungen des Jochmagnets der Länge nach erhöhen, würde die Messtiefe der aktiven Messung proportional zunehmen. Walther schlägt eine Kombination aus remanenter und aktiver Messung vor.

3.3 Detektion von Betonstahlbrüchen

Im Rahmen von grossmassstäblichen Ermüdungsversuchen am Stahlbetonrahmen für die Dissertation [FEHLMANN 2012] bestand Bedarf nach einer Prüfmethode zur zerstörungsfreien Detektion von Betonstahlbrüchen. Hierzu wurde in der Dissertation [WOLF 2012] ein Verfahren entwickelt, welches bei dem Grossversuch zum Einsatz kam. Details lassen sich im Versuchsbericht [FEHLMANN *et al.* 2011] nachlesen. Nach der Evaluierung mehrerer Prüfmethoden wurde beschlossen, die magnetische Streufeldmethode, die bisher im Bauwesen nur für Seile und Vorspannkabel verwendet wurde, für den Einsatz an schlaffer Bewehrung zu modifizieren.

Hierzu hat Wolf einen Messwagen entwickelt, mit dem sich das remanente Magnetfeld einzelner Stäbe messen lässt. Die Stäbe werden dazu zunächst mit einem Permanentmagneten magnetisiert, anschliessend wird der Messwagen von Hand entlang des Stabes bewegt. Der Messwagen verfügt über einen Drehgeber, der eine Streckenmessung durchführt. Alle 5 mm Wegstrecke wird eine Messung ausgelöst. Gemessen werden alle drei Komponenten des Magnetfeldes.

Bei der Messung ergeben sich charakteristische Kurvenverläufe. Für ein besseres Verständnis der Kurvenverläufe wurden verschiedene Versuche durchgeführt und dokumentiert. So wurden Messungen in mehrere Himmelsrichtungen durchgeführt, um einen Einfluss des Erdmagnetfeldes auszuschliessen. Ausserdem wurden Parameter variiert, wie zum Beispiel der Abstand zwischen Stab und Messeinheit, der Abstand der Bruchflächen, der Bewehrungsdurchmesser und die Stablänge. Untersucht wurden sowohl Stäbe mit Verformungsbruch als auch solche mit Ermüdungsbruch. Ausserdem wurden unterschiedli-

che Bewehrungslayouts mit Stössen und gebogener Querbewehrung nachgebildet.

Für den Grossversuch bestand die Besonderheit, dass die Bewehrung bereits am neuen, unbeschädigten Tragwerk vollständig durchgemessen werden konnte. Bei späteren Messdurchläufen konnten die Signale verglichen werden. Dadurch wurden an Schädstellen Messunterschiede deutlich, die bei einer einmaligen Messung am beschädigten Tragwerk nicht als Schädigung aufgefallen wären. Zudem waren zusätzliche Informationen aus Deformtermessungen und kontinuierlichen Rissbeobachtungen verfügbar. Um dennoch eine unbefangene Beurteilung der Aussagekraft der Methode zu ermöglichen, wurde bereits vor dem Grossversuch ein mathematischer Algorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe die Kurvenverläufe als intakter Stab oder als gebrochener Stab interpretiert werden konnten.

Während bei den einfachen Vorversuchen eine sehr gute Zuverlässigkeit erreicht wurde, stellte das verhältnismässig komplizierte Bewehrungslayout des Grossversuches eine grössere Herausforderung dar. Die Fehlerquote variierte leicht mit der Wahl der Parameter für den Algorithmus und betrug im Schnitt etwa ein Drittel. Hingegen konnten eindeutig erkannte Brüche auf wenige Zentimeter genau lokalisiert werden.

3.4 Mikromagnetische Verfahren

Mit mikromagnetischen Verfahren wird unmittelbar an der Stahloberfläche gemessen. Wie viele Prüfverfahren im Bauwesen, haben auch diese Verfahren ihren Ursprung in der Fertigungstechnik. Mit mikromagnetischen Verfahren ist eine Spannungsanalyse von magnetischen Bauteilen bis etwa 1 mm unter der Oberfläche möglich. Für Messungen an Betonbewehrungen muss diese freigelegt werden. [SCHNEIDER *et al.* 2012] nutzt dafür vier spannungsabhängige magnetische Messgrössen, unter anderem die Spannungsabhängigkeit der magnetischen Hysteresekurve. Durch eine Kombination mit Ultraschall wird eine höhere Messtiefe möglich. Für quantitative Ergebnisse müssen dem Tragwerk Bewehrungsproben entnommen und im Labor im kontrollierten Zugversuch kalibriert werden. Eine Kalibrierung über das Röntgendiffraktionsverfahren wäre theoretisch auch möglich, ist aber auf der Baustelle nicht praktikabel. Es ist möglich, Betonstähle nach ihrem Hersteller bzw. Herstellungsverfahren zu kategorisieren, so dass nicht jedes Mal eine neue Kalibrierung nötig wird. Zwischen den einzelnen Herstellern ergeben sich jedoch grössere Unterschiede im magnetischen Verhalten, auch wenn die statischen Eigenschaften identisch sind. Leider enthält die Arbeit keine Aussage dazu, welche Auswirkung das Freilegen eines Stabes auf seinen Spannungszustand hat. Da der Verbund mit dem Beton durch das Freilegen streckenweise aufgelöst wird, ist eine Auswirkung auf die Spannung denkbar.

4 Methode zur Messung und Auswertung

4.1 Vorgehen zur Ortung von Betonstahlbrüchen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise erklärt und anhand von Abbildungen veranschaulicht. Die Beschreibung der Vorgehensweise und die Herleitung der Bruchsignale wurden teilweise in [DIEDERICH/VOGEL 2014] veröffentlicht.

4.1.1 Bewehrung

Die Methode, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt und erforscht wird, beschäftigt sich mit der konventionellen, schlaffen Bewehrung. Die Anwendung auf Fertigelemente, die im Spannbett vorgespannt wurden, ist ebenfalls möglich. Der begrenzende Faktor ist die Überdeckung, denn für grosse Überdeckungen sind stärkere und vor allem schwerere Magnetisierungseinrichtungen nötig. Für die Entwicklung eines Handgerätes ist das Gewicht ein entscheidendes Kriterium. Die im Brückenbau üblichen Überdeckungen bis 55 mm lassen eine zerstörungsfreie Messung zu.

Schematisch ist ein Bewehrungslayout mit Bruch in Abbildung 4.1 dargestellt. Ob es sich beim Bruch um einen Verformungsbruch oder einen Ermüdungsbruch handelt, ist unerheblich. Ein Spalt zwischen beiden Bruchflächen erleichtert die Detektion, ist aber nicht zwingend notwendig, um ein deutliches Bruchsignal zu erhalten. Die beiden oberen Bewehrungslagen sind grundsätzlich für Messungen zugänglich, müssen aber separat magnetisiert und gemessen werden. Die Magnetisierung und Messung muss immer längs zu der Bewehrung erfolgen, in der man Brüche detektieren möchte.

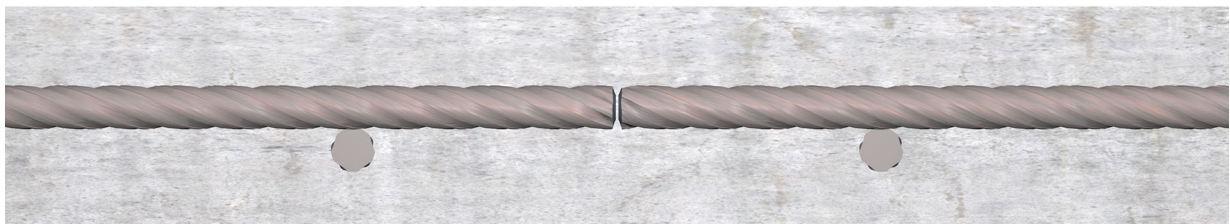


Abb. 4.1 Schematisches Bewehrungslayout mit Bruch

4.1.2 Magnet

In jedem Fall hat die Bewehrung bereits eine magnetische Vorgeschichte. Infolge des Fertigungsprozesses oder durch einen Transport mittels Hubmagnet verbleibt eine remanente Magnetisierung im Stahl. Diese Magnetisierung ist in ihrer Stärke und Ausrichtung unregelmässig und nicht berechenbar. Diese unregelmässige Magnetisierung soll durch eine einheitliche Magnetisierung überschrieben werden. Dies kann durch einen starken Permanentmagnet erreicht werden, der längs entlang dem Stahl bewegt wird. (Abb.4.2) Wenn möglich, sollte der Permanentmagnet so gewählt werden, dass er die Bewehrung bis zur Sättigung magnetisiert.

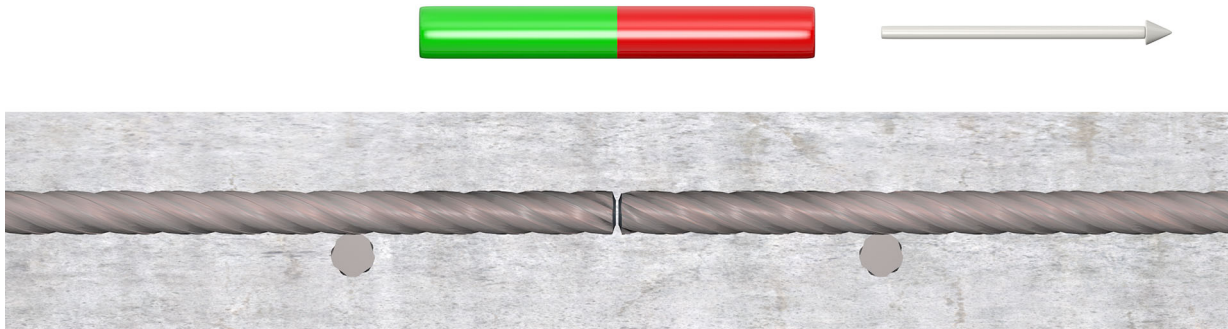


Abb. 4.2 Permanentmagnet wird längs des Bewehrungsstabes bewegt

4.1.3 Magnetfeld

Der Permanentmagnet erzeugt in seinem Umfeld ein magnetisches Feld. Wichtig für die Magnetisierung der Bewehrung sind aber lediglich die Feldlinien, die durch die Bewehrung verlaufen. Dargestellt ist eine dieser Feldlinien. (Abb. 4.3)

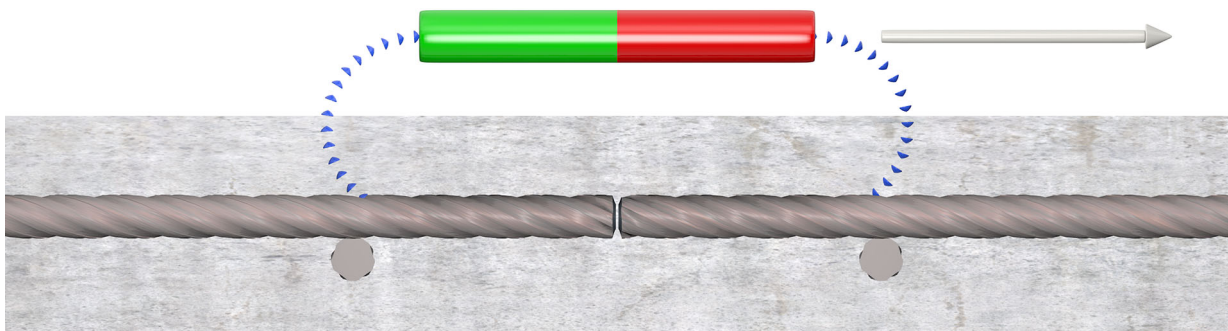


Abb. 4.3 Magnetfeld des Permanentmagnets

4.1.4 Magnetisierung

Während der Magnet entlang des Stabes bewegt wird, hinterlässt er eine einheitliche Magnetisierung, wie durch die kleineren Magnete illustriert wird. Die Magnetisierung im Bewehrungsstahl verläuft in entgegengesetzter

Richtung zum Permanentmagnet. Der Grund dafür liegt in der Richtung der Feldlinien, die immer vom Nordpol (rot) zum Südpol (grün) verlaufen. (Abb. 4.4)

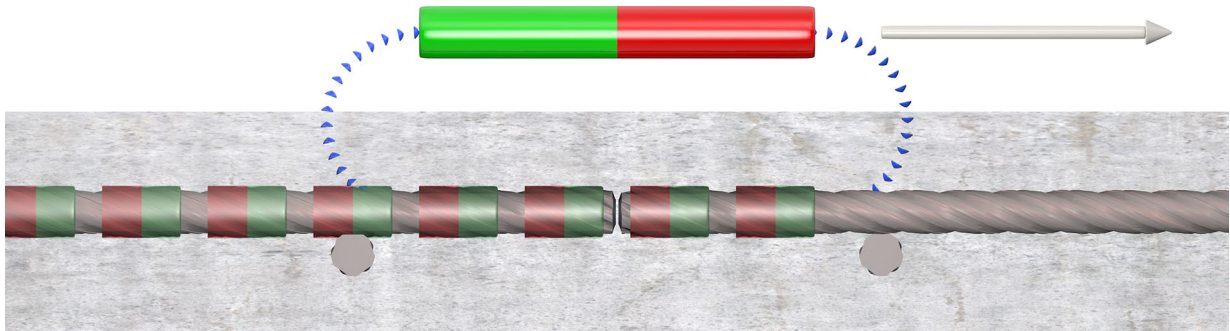


Abb. 4.4 Magnetisierungsrichtung

4.1.5 Remanenz

Nach abgeschlossener Magnetisierung verbleibt nun eine remanente Magnetisierung im Stahl zurück. (Abb. 4.5) Der Bewehrungsstab verhält sich nun wie ein langer, jedoch schwacher Permanentmagnet. Der Stahlstab behält seine Magnetisierung, solange er nicht erneut einem starken Magnetfeld ausgesetzt wird. Hitze oder starke Erschütterungen können die Magnetisierung abschwächen.

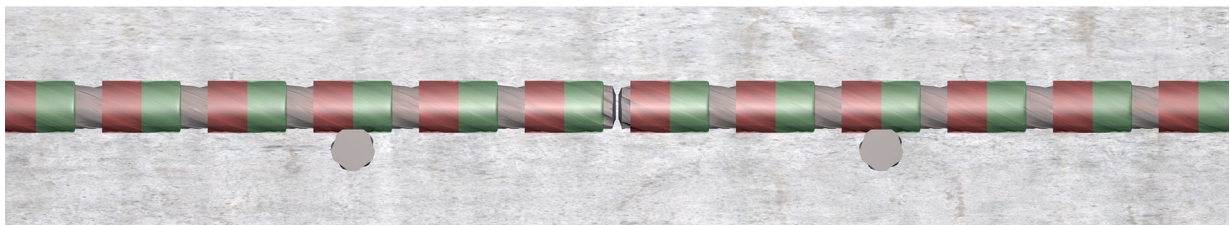


Abb. 4.5 Remanente Magnetisierung des Bewehrungsstabes

4.1.6 Streufeld

Der entscheidende physikalische Effekt an dieser Stelle ist die unterschiedliche magnetische Permeabilität der Materialien. Während Beton und Luft nur eine sehr kleine magnetische Permeabilität haben, kann der Stahl den magnetischen Fluss sehr effizient leiten. Der magnetische Fluss wird daher, wann immer es möglich ist, durch den Stahl fließen. Ist der Weg durch den Stahl jedoch unterbrochen, weil der Bewehrungsstab gebrochen ist, verändert sich die Situation massgeblich. Ein grosser Teil des Flusses wird seine Richtung nicht ändern und auf direktem Wege von einer Bruchfläche zur anderen fließen. Da die magnetische Permeabilität im Spalt jedoch gering ist, wird ein anderer Teil des Flusses weiträumig ausweichen müssen. Dabei treten Feldlinien bereits vor dem Bruch aus dem Bewehrungsstab aus und treten erst nach dem Bruch wieder in den Stahl ein. Aufgrund der geringen Permeabilität von Luft und

Beton muss dieser Fluss ein grosses Volumen in Anspruch nehmen und bildet ein Streufeld um die Bruchstelle. Eine Feldlinie dieses Streufeldes ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

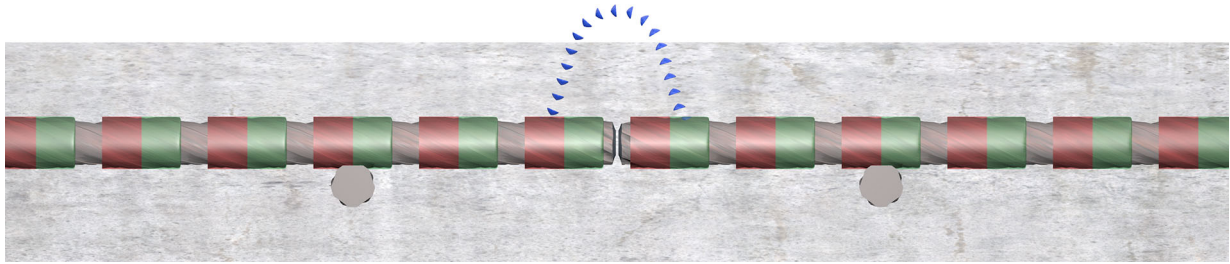


Abb. 4.6 Streufeld an der Bruchstelle

4.1.7 Remanenzmessung

Die Feldlinien des Streufeldes, die über die Betonüberdeckung herausreichen, lassen sich mit einem geeigneten Messgerät erfassen und aufzeichnen. Die Methode, wie sie bis hierhin beschrieben wurde, und der Messwagen, der in Abbildung 4.7 schematisch dargestellt ist, wurden in einem vorhergehenden Projekt von [WOLF 2012] entwickelt.

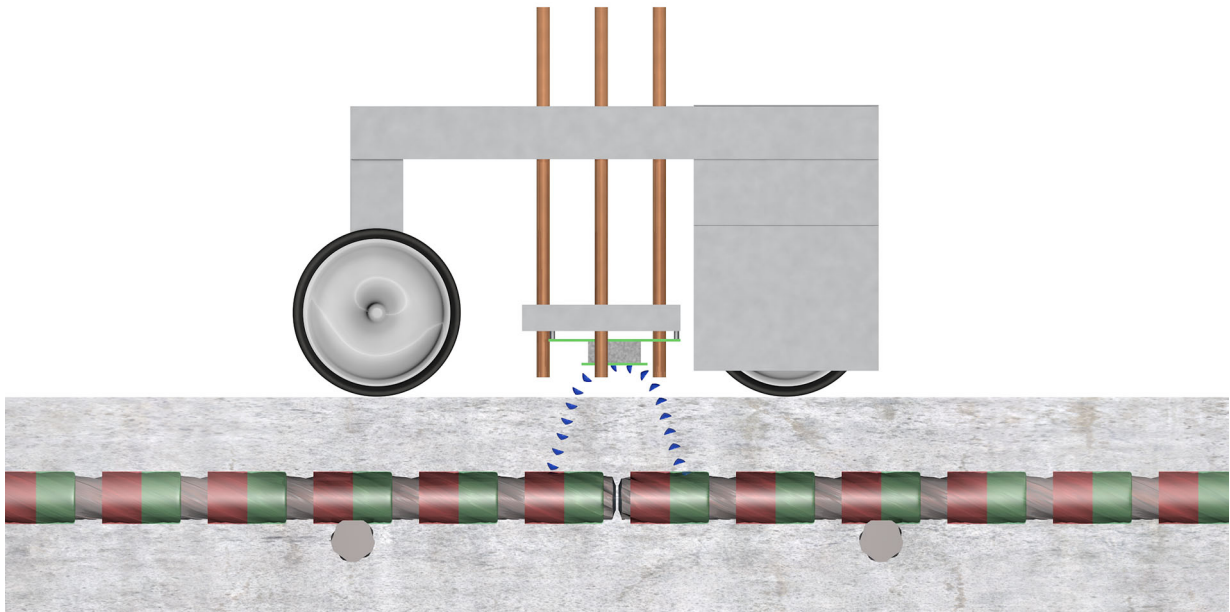


Abb. 4.7 Remanenzmessung des Streufeldes

4.1.8 Aktivmessung

Anstelle einer Messung des remanenten Feldes, kann auch eine Aktivmessung durchgeführt werden. Die beiden Arbeitsschritte für Magnetisierung und Messung werden dabei in einem einzigen Schritt ausgeführt.

Der Messwagen für die Aktivmessung ist mit Eisenkern und Magnetspulen ausgestattet. Der Eisenkern ist hufeisenförmig und nach unten gerichtet. Der

magnetische Fluss wird dabei direkt auf die Betonoberfläche gerichtet und sucht sich seinen Weg in einen Bewehrungsstab. Der magnetische Fluss verlässt den Bewehrungsstab spätestens, um an der anderen Seite des Messwagens wieder in den Eisenkern zurückzufließen. Falls der Bewehrungsstab gebrochen ist, entsteht wie in Abbildung 4.8 dargestellt, erneut ein Streufeld.

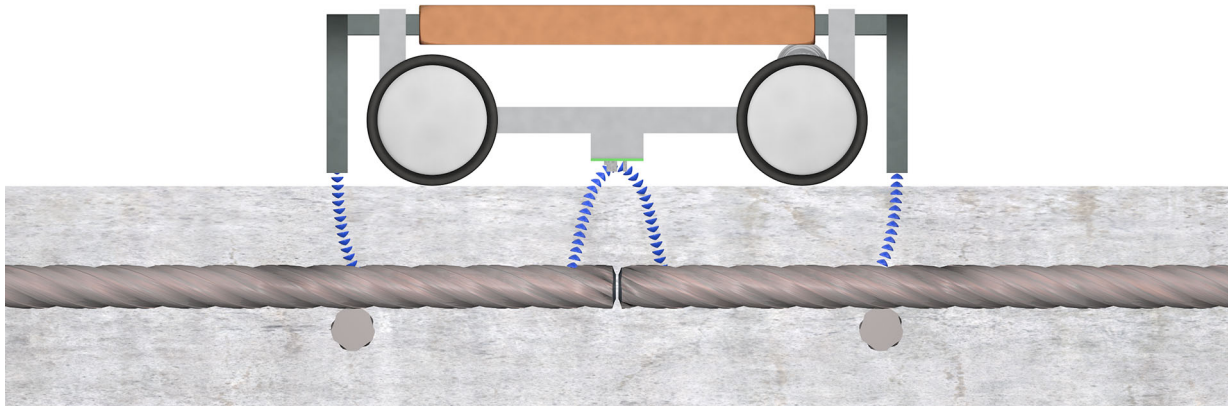


Abb. 4.8 Aktivmessung des Streufeldes

4.2 Stabsignale und Bruchsignale

Im Folgenden wird veranschaulicht, wie übliche Stabsignale und Bruchsignale zustande kommen. Das Verständnis der Signalarten erleichtert die Interpretation der Messergebnisse.

Die hier dargestellten Magnete haben jeweils links den Südpol und rechts den Nordpol. Die Messung sei von links nach rechts durchgeführt. Kehrt man entweder den Magnet oder die Messrichtung um, so verändert man das Vorzeichen der Messergebnisse.

In Abbildung 4.9 ist ein Permanentmagnet dargestellt. Der Magnet erzeugt ein Magnetfeld in seiner Umgebung, dessen Ausrichtung durch Pfeile dargestellt ist. Ein magnetisierter Bewehrungsstab ist vergleichbar mit einem langen und schwachen Permanentmagnet.

Das gesamte Magnetfeld enthält wertvolle Informationen über die Bewehrung. Der Bereich innerhalb des grau dargestellten Betons, ist jedoch für eine zerstörungsfreie Prüfung nicht zugänglich. Zugänglich ist nur der Bereich oberhalb der Betonoberfläche, wobei die Signalschärfe abnimmt, je weiter man sich vom Stab entfernt. Es wird daher nur der Bereich unmittelbar über der Betonoberfläche gemessen und ausgewertet.

Die Messlinie ist durch eine schwarz gestrichelte Linie angedeutet und befindet sich mittig über dem Stab. Entlang dieser Linie wird das Magnetfeld in seinen drei Komponenten erfasst und mittels drei Kurven dargestellt. Markante Signale sind das Stabanfangs- und das Stabendsignal.

Die drei Komponenten des Magnetfeldes auf der Messlinie werden nun gesondert betrachtet:

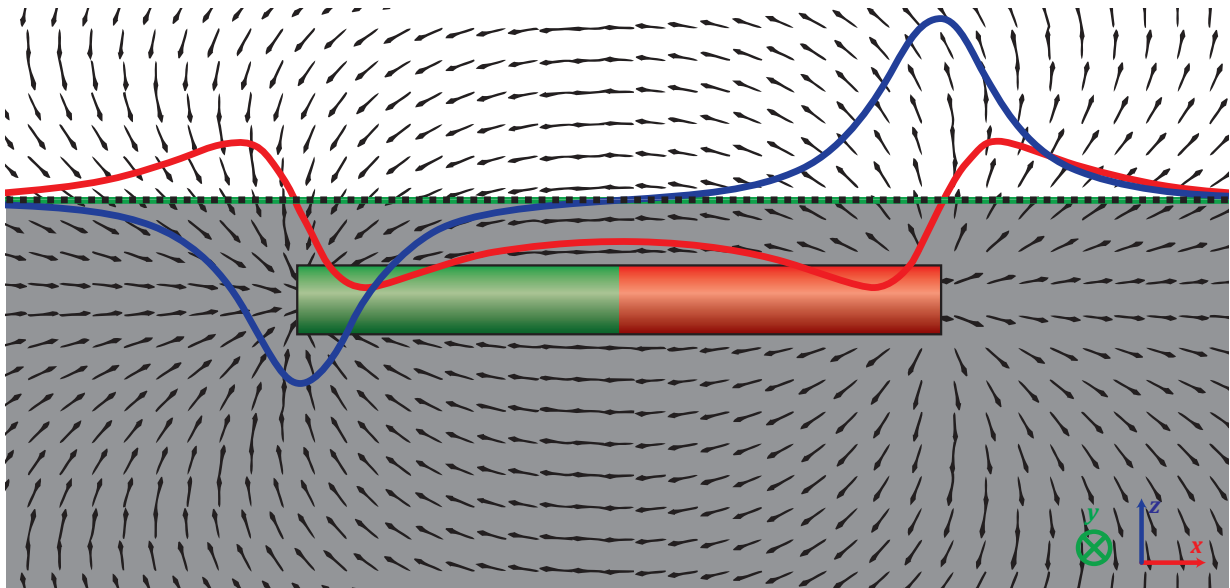


Abb. 4.9 Stabanfangs- und Stabendsignal eines Permanentmagnets

- **x-Komponente:** Betrachtet man die Richtung der Pfeile am Stabanfang (links), so stellt man fest, dass diese weit vor dem Stabanfang noch leicht nach rechts gerichtet sind, exakt beim Stabanfang gerade nach unten zeigen und hinter dem Stabanfang allmählich nach links zeigen. Der Stabanfang wird also durch einen Nulldurchgang bzw. Vorzeichenwechsel der horizontalen Komponente gekennzeichnet. Am Stabende lässt sich der Vorzeichenwechsel in die umgekehrte Richtung beobachten.
- **y-Komponente:** Im dargestellten Schnitt existiert kein magnetisches Feld senkrecht zur Blattebene. Die y-Komponente ist daher konstant null. Würde man nicht exakt über dem Stab messen, sondern leicht neben dem Stab ergäben sich Abweichungen von der Nulllinie.
- **z-Komponente:** Man betrachte erneut die Pfeile am Stabanfang und achte auf die vertikale Ausrichtung. Dabei fällt auf, dass die Pfeile auf der Messlinie exakt über dem Stabanfang am deutlichsten nach unten zeigen. An dieser Stelle ergibt sich also ein lokales Minimum. Entsprechend bildet sich am Stabende ein lokales Maximum aus.

Möchte man nun wissen, wie ein Bruchsignal aussieht, kann man die Erkenntnisse über Stabanfangs- und Stabendsignal nutzen. Ein Stab mit Bruch ist nämlich vergleichbar mit zwei Einzelstäben, die unmittelbar hintereinander liegen. Näherungsweise gilt hier das Superpositionsprinzip, weshalb ein Bruchsignal der Überlagerung eines Stabendsignals und eines Stabanfangssignals entspricht (Abb. 4.10). Die beiden Signale können unter Berücksichtigung des Bruchflächenabstandes überlagert werden. Es ergibt sich für die x-Komponente ein Hochpunkt und für die z-Komponente ein Wendepunkt, der gleichzeitig Nulldurchgang ist. Die y-Komponente tritt nur neben dem Stab in Erscheinung, nicht aber exakt darüber.

4.3 Superpositionsprinzip

Streng mathematisch ist das Superpositionsprinzip nur für lineare Systeme gültig. Verhält sich in einem System aber die Systemantwort nicht proportional zur Systemeingabe, so ist das System nichtlinear und das Superpositionsprinzip ist streng genommen nicht anwendbar.

Nun bildet die Hysteresekurve (Abb. 2.22, S. 27) ganz deutlich ein nichtlineares System ab. Die Systemantwort hängt nicht nur von der aktuellen Systemeingabe ab, sondern auch von den Systemeingaben der Vergangenheit. Um die Systemantwort vorherzusagen, müsste man entweder sämtliche Systemeingaben der Vergangenheit kennen, oder aber selbst eine Systemeingabe vornehmen, die zu einer trivialen Ausgabe führt. Das bedeutet, dass man ein derart starkes Magnetfeld als Systemeingabe aufbringt, dass die Systemausgabe der Sättigungskurve der Hysterese entspricht.

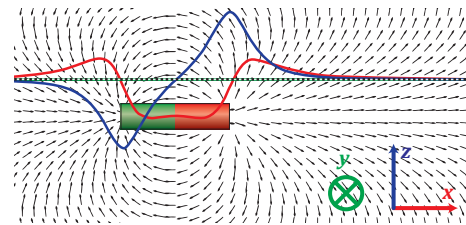
Das Problem der Hysterese lässt sich durch die Magnetisierung bis zur Sättigung jedoch nur teilweise lösen. Die Magnetisierung hängt nämlich nicht nur von der Magnetisierungsgeschichte ab, hat also nicht nur eine zeitliche Komponente, sondern auch eine räumliche. Inwieweit ein Körper die Magnetisierung annimmt und behält ist stark geometrieabhängig. Dieser Zusammenhang kann für einfache Grundformen über den Entmagnetisierungsfaktor (Abb. 2.24, S. 29) ausgedrückt werden.

Während sich der Entmagnetisierungsfaktor lediglich für ein Rotationsellipsoid analytisch herleiten lässt (vgl. [STILLE 1944]), kennt die Literatur für zylinderförmige Körper immerhin einige empirische Abschätzungen (vgl. [WARMUTH 1937], [WARMUTH 1939] und [WARMUTH 1954]). Diese gelten jedoch nur für einzelne Körper und verlieren ihre Gültigkeit bei der Superposition zweier Körper.

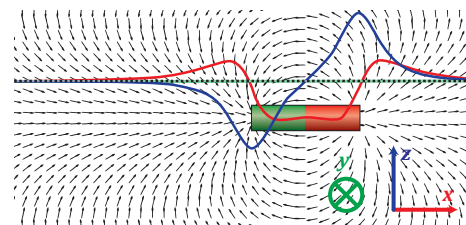
Es existieren einige mathematische Idealisierungen der magnetischen Hysteresekurve, die eine Simulation dieser Effekte erlauben. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt dabei vom gewählten Verfahren und von der Verlässlichkeit der Materialkennwerte ab. Der Rechenaufwand ist in jedem Fall beträchtlich. Eine gute Übersicht über die wichtigsten Rechenverfahren liefert [ROSENBAUM 2011].

4.4 Simulationen

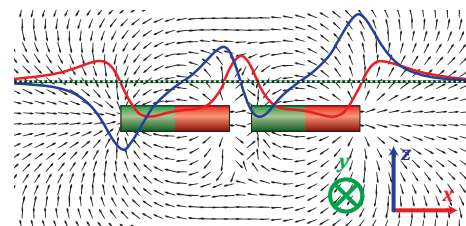
Wann immer in dieser Ausarbeitung auf Simulationen zurückgegriffen wird, werden die Effekte der Hysterese vernachlässigt. Die Simulationen können daher nur als Grundlage für qualitative, nicht aber für quantitative Aussagen



a) Ein Einzelstab links ...



b) ... und ein weiterer Einzelstab rechts ...



c) ... werden superponiert zu zwei Einzelstäben bzw. einem einzigen Stab mit Unterbrechung.

Abb. 4.10 Bruchsignal aus Superposition von Stabend- und Stabanfangssignal

dienen.

Die durchgeführten Simulationen sind damit geeignet, qualitative Aussagen über Signale zu treffen, wie sie bei bestimmten Bewehrungsanordnungen und Bruchsituationen auftreten, es kann jedoch praktisch keine Aussage über Stärke und Ausbreitung des Signals getroffen werden.

Auch wenn es um die konzeptionelle Planung des Messwagens geht, können nur qualitative Vorhersagen getroffen werden. So kann beispielsweise durch Simulationen gezeigt werden, dass bei einer Aktivmessung die Länge des Jochmagnets entscheidend für die Messtiefe ist. (Diesen Zusammenhang hat [WALTHER 2012] bereits festgestellt.) Welche Messtiefe tatsächlich erreicht werden kann, zeigt sich jedoch erst mit dem Bau eines Prototypen.

4.5 Detektion

Es ist ein Ziel dieser Arbeit, Messwerte in ein möglichst aussagekräftiges Bild zu übersetzen, um dem geschulten Auge des Ingenieurs eine schnelle und intuitive Beurteilung der Messung zu erlauben. Es ist dennoch zusätzlich wünschenswert, eine automatische Detektion zur Verfügung zu haben. Einerseits aus praktischen Gründen: Wenn eine höhere Messgeschwindigkeit die Aufnahme grösserer Flächen erlaubt und entsprechend viele Messdaten gesichtet und ausgewertet werden müssen, sollten auch bei der Auswertung geeignete Hilfsmittel zu Verfügung stehen. Es besteht ansonsten die Gefahr, dass Bruchsignale zwar sichtbar wären, in der Masse der Daten aber übersehen werden. Andererseits erlaubt eine automatische Detektion von der wissenschaftlichen Seite her eine Beurteilung der Detektionswahrscheinlichkeit des Messverfahrens, besonders dann, wenn es ein hartes mathematisches Kriterium für ein Bruchsignal gibt.

Bereits im Projekt von [WOLF 2012] kam ein Bruchalgorithmus zum Einsatz, der die gemessenen Signale mithilfe mehrerer mathematischer Kriterien untersucht. Sind alle Kriterien kumulativ erfüllt, wird eine Bruchposition ausgegeben. Je nach gewählten Parametern des Modells schwankte die Zahl der falsch-negativen und falsch-positiven Ergebnisse zwischen 16% und 22% bzw. zwischen 5% und 21%. Der Algorithmus wäre prinzipiell auch auf die Aktivmessungen aus diesem Projekt anwendbar, sollte dann aber mindestens um eine weitere Komponente erweitert werden, um die flächigen Messdaten vollständig auszunutzen. Da der Algorithmus zu wenig robust auf Überlagerungen aus Störquellen reagiert, werden in diesem Projekt andere Verfahren untersucht.

4.5.1 Neuronale Netze

Eine besondere Herausforderung bei der Nutzung von neuronalen Netzen ist der Bedarf nach einer Vielzahl von Lernsituationen. Aus praktischen Gründen ist es nicht zu bewerkstelligen, dem Netz eine ausreichende

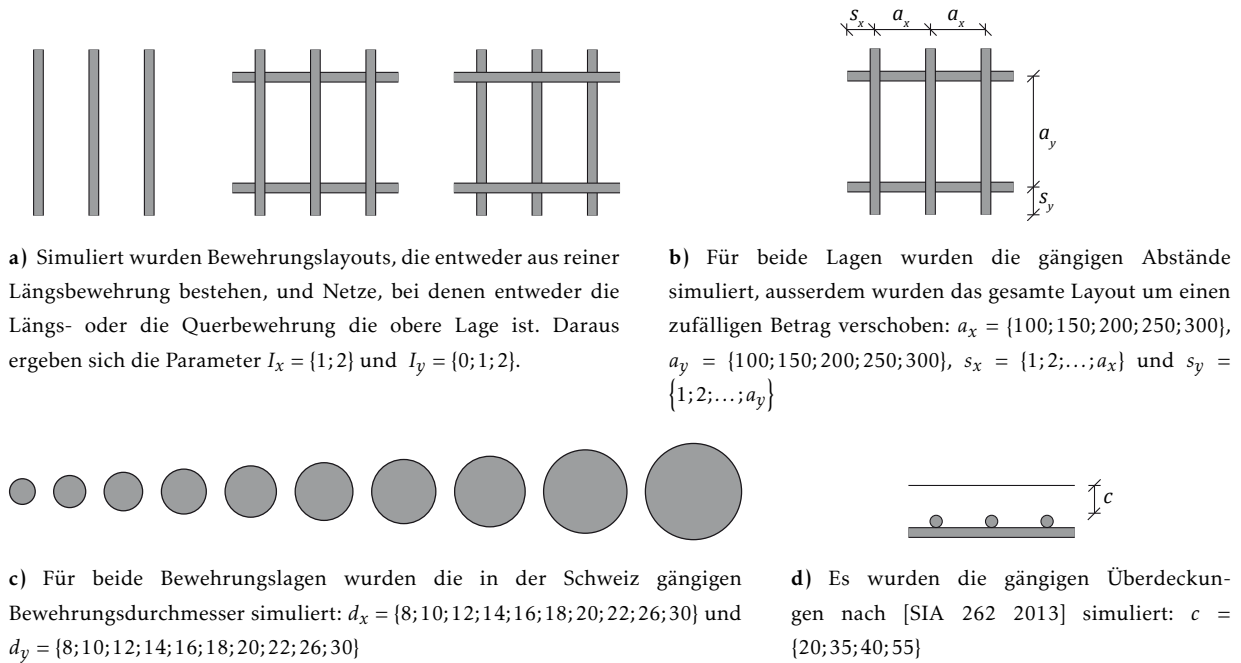


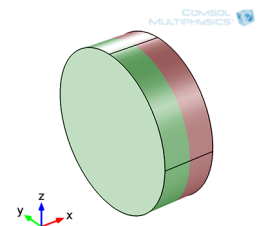
Abb. 4.11 Parameter der simulierten Bewehrungslayouts

Anzahl echter Messungen zum Lernen zu übergeben, auch eine Modellierung von Bewehrungsanordnungen echter Bauwerke in Simulationen gestaltet sich zu aufwändig. Es wurde daher ein Zufallsgenerator programmiert, der Bewehrungslayouts nach einem vorgegebenen Muster generiert. Mit den möglichen Parametern aus Abbildung 4.11 sind insgesamt $20'200$ unterschiedliche Layouts möglich. Da die Layouts noch in beide Richtungen um eine zufällige Strecke verschoben werden, ergeben sich $8 \cdot 10^8$ Möglichkeiten. Aus diesen Möglichkeiten wurden $1'000$ zufällige Layouts generiert.

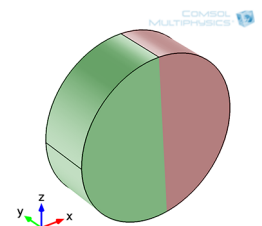
Um die generierten Bewehrungslayouts in Messwerte zu übersetzen, wurden in Comsol Scheibenmagnete in allen gängigen Bewehrungsdurchmessern modelliert (Abb. 4.12) und deren Feld in der Umgebung simuliert. Die simulierten Felder wurden entsprechend dem gewünschten Layout superponiert. Die Layouts als Ganzes zu simulieren hätte einen zu hohen Rechenaufwand bedeutet.

Auf diese Weise wurden zu jedem Layout Messwerte auf einer Fläche von 1 m^2 mit einer Auflösung von 100×100 Messwerten simuliert. Eines der simulierten Layouts ist in Abbildung 4.13 dargestellt und beinhaltet ein Messbild für das intakte Layout, eines für das Bruchsignal und eine Superposition aus beiden.

Das neuronale Netz hat nun die Aufgabe, aus dem Messbild mit Bruch (Abb. 4.13c)) sämtliche Signale der Bewehrung auszublenden und nur das reine Bruchsignal (Abb. 4.13b)) auszugeben. Im Idealfall würde ein so grosses Netz angelegt, welches das Messbild als Ganzes einlesen und das Bruchsignal als Ganzes ausgeben könnte. Dies scheitert aber selbst bei einer einfachen Netzarchitektur sowohl am Rechenaufwand, als auch am Bedarf an Arbeitsspeicher.

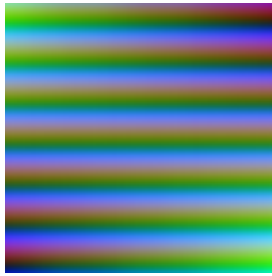


a) Die Längsbewehrung verläuft in x-Richtung und wurde in x-Richtung magnetisiert.

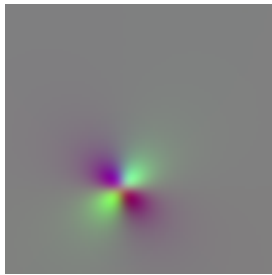


b) Die Querbewehrung verläuft in y-Richtung, wurde aber in x-Richtung magnetisiert.

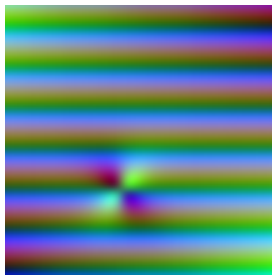
Abb. 4.12 Modellierung der Bewehrung als Aneinanderreihung von Scheibenmagneten



a) Simuliert wurde zunächst ein intaktes Bewehrungslayout.



b) Das Bruchsignal wird als Magnetscheibe mit umgekehrter Magnetisierungsrichtung modelliert.



c) Die Superposition des intakten Layouts mit dem Bruchsignal ergibt das vollständige Messbild.

Abb. 4.13 Nach Zufallsparametern simuliertes Bewehrungslayout

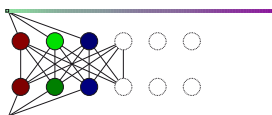


Abb. 4.14 Netzarchitektur

Daher verarbeitet das Netz jeweils nur einen Teil des Messbildes auf einmal, in diesem Beispiel eine Bildzeile mit 100x1 Pixeln mit allen drei Koordinatenrichtungen. Zum Einlesen der Bildzeile und zum Ausgeben einer gleich grossen Bildzeile werden 300 Eingabe- bzw. Ausgabeneuronen benötigt. Jedes Eingabeneuron ist in der Gewichtsschicht mit jedem Ausgabeneuron verbunden, wodurch sich insgesamt 90'000 Verbindungen ergeben. (Abb. 4.14)

Eine Software (Abb. 4.15) hat nun die Aufgabe, für diese 90'000 Verbindungen geeignete Gewichte zu ermitteln. Dazu wird wiederholt eine zufällige Bildzeile eines Messbildes ausgewählt und dem Netz Eingangs- und Ausgangsgrössen vorgegeben. Die Gewichte werden so weit optimiert, bis das Netz aus den Eingangsgrössen selbst die Ausgangsgrössen mit hinreichender Genauigkeit errechnen kann. Von den 1'000 simulierten Layouts werden dem Netz dabei nur die letzten 900 zum Lernen vorgelegt, die ersten 100 dienen dabei der Kontrolle. Bei den gewählten Netzparametern hat das Netz nach 1'000'000 Lernschritten und einer Stunde Rechenzeit auf der Workstation sein Optimum erreicht.

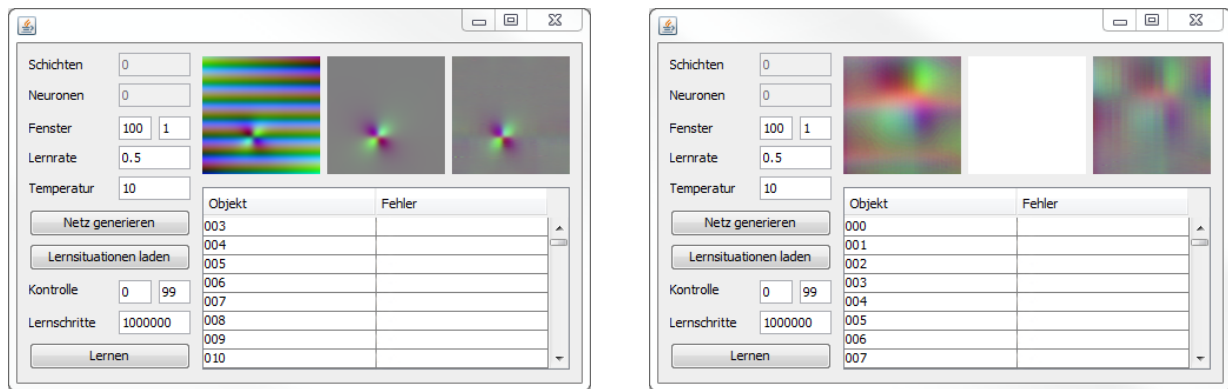
Grundsätzlich zeigen die simulierten Layouts eine sehr gute Wiedergabe durch das Netz. Für das gezeigte Kontroll-Layout (Abb. 4.15a)) ist kaum ein Unterschied zwischen dem Zielbild (mittig) und der tatsächlichen Netzausgabe (rechts) festzustellen. Für ein echtes Messbild (Abb. 4.15b)) ist naturgemäss kein Zielbild vorhanden. Das Netz hat dort zwar gegenüber dem Eingangsbild (links) in der Netzausgabe (rechts) die Signale der beiden Querbewehrungsstäbe vollständig eliminiert, was gewünscht ist, allerdings wurde auch das Bruchsignal deutlich abgeschwächt.

Fazit

Zwar konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von neuronalen Netzen grundsätzlich möglich wäre, einer weiteren Verbesserung stehen allerdings einige Schwierigkeiten entgegen.

Es ist davon auszugehen, dass eine zeilenweise Abarbeitung des Messbildes komplexeren Bewehrungslayouts nicht mehr gerecht wird. Die Netzarchitektur müsste auf einen grösseren Bildausschnitt ausgelegt werden, wodurch sich die momentan sehr moderate Rechendauer überproportional erhöhen würde. Eine Parallelisierung des Lernprozesses auf mehrere Prozessorkerne ist nicht möglich. Von Vorteil ist, dass die Netzausgabe bei einem bereits angelernten Netz kaum Rechenleistung beansprucht.

Der Blackbox-Charakter des neuronalen Netzes lässt kaum eine Vorhersage zu, wie das Netz auf Situationen reagiert, auf die es nicht angelernt wurde. Die Netzausgabe für das echte Messbild (Abb. 4.15b)) zeigt aber, dass eine gewisse Generalisierung der Information stattgefunden hat, obwohl eine eher einfache Netzarchitektur gewählt wurde. Für komplexere Probleme ist gegebenenfalls eine weitere Gewichtsschicht nötig. Die Probleme sind zwar lösbar, legen aber die Suche nach einem alternativen Verfahren nahe.



a) Ergebnis für ein simuliertes Layout

b) Ergebnis für ein echtes Messbild

Abb. 4.15 Software für neuronales Netz

4.5.2 Bildvergleich mittels Korrelationskoeffizient

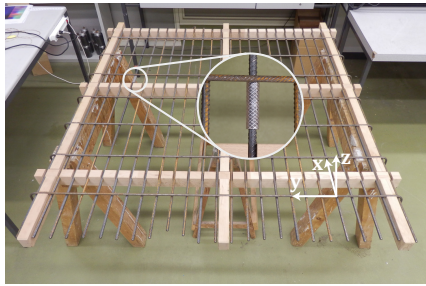
Am Versuchsrahmen von [WOLF 2012] (Abb. 4.16a)) wurde ein Messbild aufgenommen, um daran den Bildvergleich mittels Korrelationskoeffizient zu veranschaulichen. Das Messbild deckt vier Längsstäbe ab, die in der Messung nicht sichtbar sind, von denen ein Stab jedoch einen präparierten und sichtbaren Bruch hat und ausserdem sechs Querstäbe. Zur besseren Interpretation wurden die Messbilder aller drei Komponenten und eine kombinierte Darstellung über das Foto des Versuchsrahmens gelegt (Abb. 4.16b)).

Im Buch [BURGER/BURGE 2015] werden verschiedene Verfahren für Bildvergleiche mittels Template Matching in Intensitätsbildern diskutiert. Dabei wird ein Referenzbild auf jeder möglichen Position mit einem gleich grossen Ausschnitt des Zielbildes verglichen. (Abb. 4.16c)) Ein Algorithmus berechnet die Übereinstimmung beider Bilder für jede mögliche Position.

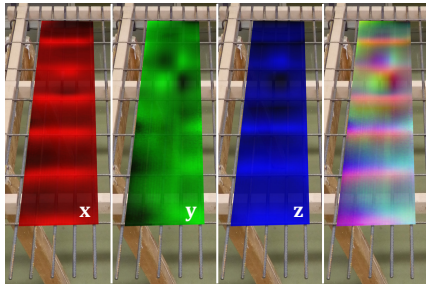
Ein Intensitätsbild ist ein Bild mit nur einem Farbkanal. Das Messbild (Abb. 4.16f)) mit seinen drei Farbkanälen muss also in drei Intensitätsbilder aufgeteilt werden, ebenso das simulierte Bruchbild (Abb. 4.16d)), welches als Referenzbild genutzt wird.

Als Algorithmus für den Vergleich wird für jede mögliche Position der Korrelationskoeffizient zwischen beiden Bildern berechnet und das Ergebnis auf einem neuen Bild (Abb. 4.16g)) eingetragen. Dabei stehen helle Werte für eine stärkere und dunkle Werte für eine schwächere Korrelation. Für die Implementation wurden Quelltexte aus [BURGER/BURGE 2015] mit Anpassungen übernommen und zusätzlich auf die quelloffene Java-Bibliothek ImageJ zurückgegriffen.

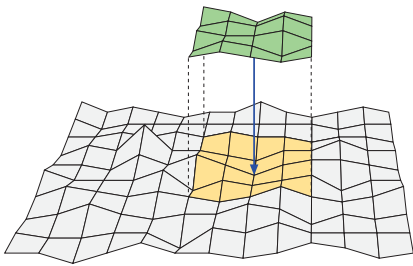
In allen drei Farbkanälen korreliert das Bruchbild deutlich an der Bruchposition. Im roten Farbkanal ist zusätzlich eine Korrelation mit der Querbewehrung sichtbar, was im blauen Kanal auch der Fall ist, nur deutlich weniger ausgeprägt. Der grüne Kanal zeigt einige Effekte am Rand des Messbereichs. Die Zuverlässigkeit im Randbereich des Bildes ist grundsätzlich



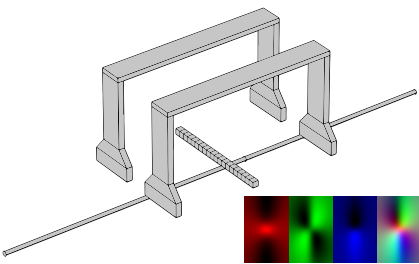
a) Versuchsraster mit Bruch



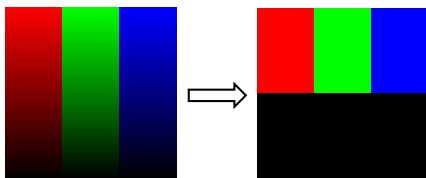
b) Overlay der Messwerte



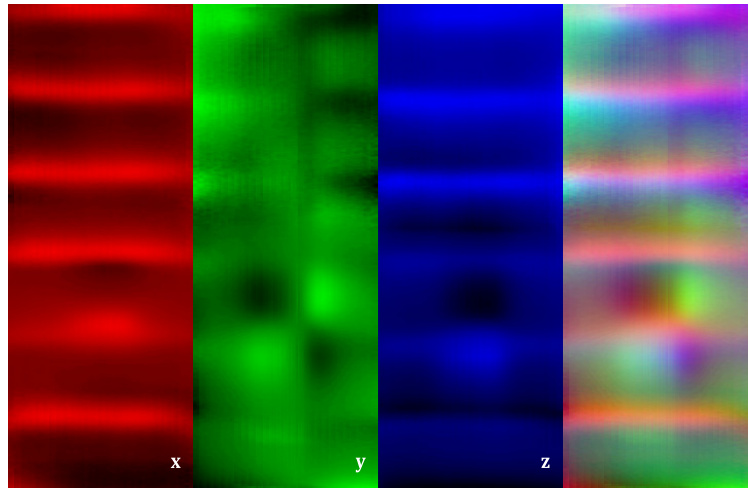
c) Template Matching, aus [BURGER/BURGE 2015]



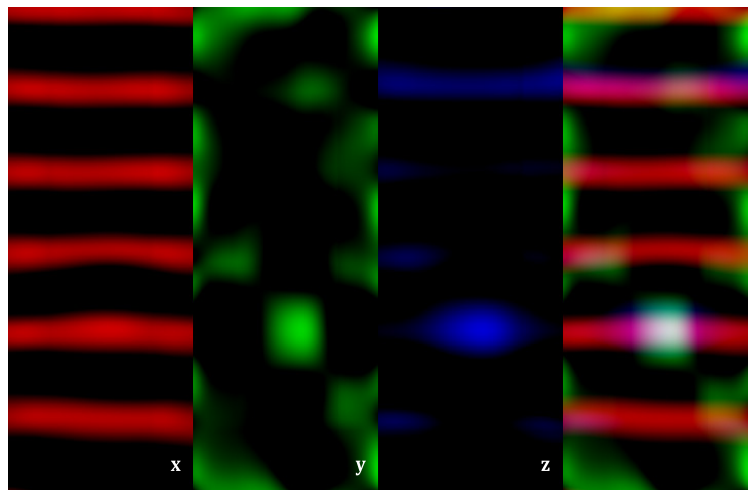
d) Simuliertes Bruchsignal



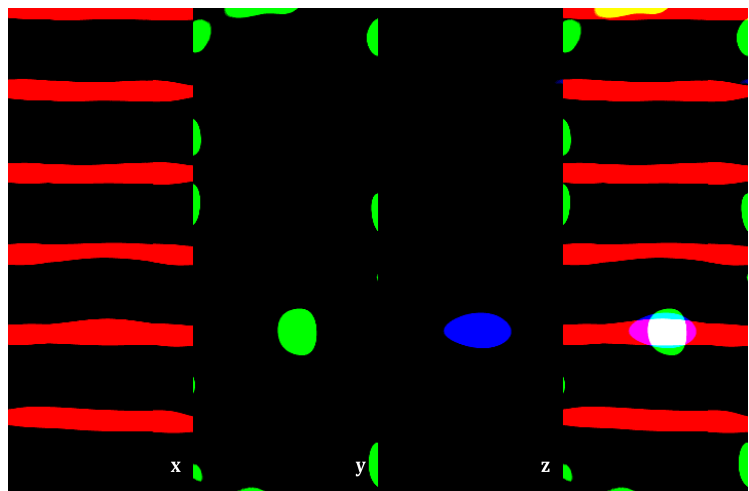
e) Anwendung Schwellenwerte



f) Messbild am Versuchsraster mit Bruch



g) Ergebnis der Korrelationsberechnung



h) Schwellenwertberechnung

Abb. 4.16 Anwendung des Template Matching auf ein Messbild

geringer, da am Rand kleinere Flächen miteinander abgeglichen werden und so zufällige Korrelationen eher auftreten können als in der Mitte des Bildes.

Von Interesse sind die Positionen, auf denen alle drei Kanäle eine deutliche Übereinstimmung zeigen. Eine simple Schwellenwert-Operation eliminiert dazu alle Farben unter 50% Helligkeit und definiert alle Farben über 50% Helligkeit als vollständig gesättigt (Abb. 4.16e)). Das Ergebnis in Abbildung 4.16h) zeigt an der Bruchposition, an der alle drei Farbkanäle gesättigt sind, eine weisse Fläche. An dieser Stelle ist das Bruchkriterium erfüllt.

Der Algorithmus wurde mit Anwendungsbeispiel zuerst in [DIEDERICH/VOGEL 2015] und [DIEDERICH/VOGEL 2016] publiziert.

Fazit

Das Matching mittels Korrelationskoeffizient ist mathematisch ein recht einfaches Verfahren und hat im Gegensatz zum neuronalen Netz den Vorteil, dass die Arbeitsweise des Algorithmus durchschaubar ist.

Das Verfahren ist ausserordentlich robust gegen Störsignale jeder Art, die das Bruchsignal teilweise überlagern, weil in diesem Fall immer noch eine Korrelation vorhanden ist.

Es ist von Vorteil, den Durchmesser und die Messdistanz zur Längsbewehrung grob zu kennen, um ein möglichst ähnliches Referenzbild auswählen zu können. Die Methode funktioniert allerdings auch hinreichend genau, wenn diese Parameter nicht bekannt sind.

Bei schwachen Bruchsignalen bzw. starken Störsignalen ist gegebenenfalls eine manuelle Anpassung der Schwellenwerte nötig.

Ein Bruchsignal wird nur ausgelöst, wenn alle drei Farbkanäle gesättigt sind. Damit ein falsch-positives Signal entsteht, müssen sich in allen drei Komponenten zufällige und genügend starke Korrelationen ergeben. Für ein falsch-negatives Signal reicht dagegen nur eine Komponente, die fälschlicherweise nicht genügend mit dem Bruchsignal korreliert. Daher ist eher mit falsch-negativen als mit falsch-positiven Signalen zu rechnen.

4.6 Untersuchung verschiedener Schadensarten

Aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Forschungsprojekt zum Ermüdungsverhalten von Plattenstreifen von [SPATHELF 2016] liegt der Schwerpunkt dieses Projekts auf der Detektion von Betonstahlbrüchen. Dabei ist mit der entwickelten Methode grundsätzlich jede Schadensart im Betonstahl detektierbar, solange sie ein Streufeld von hinreichender Grösse verursacht. Dazu muss der jeweilige Stab nicht unbedingt vollständig gebrochen sein. Prinzipiell kann auch ein Riss über einen Teilquerschnitt oder ein Materialverlust in Folge örtlicher Korrosion wie Lochkorrosion oder Lochfrass ausreichen.

Um die Detektierbarkeit unterschiedlicher Schäden zu untersuchen, wurden

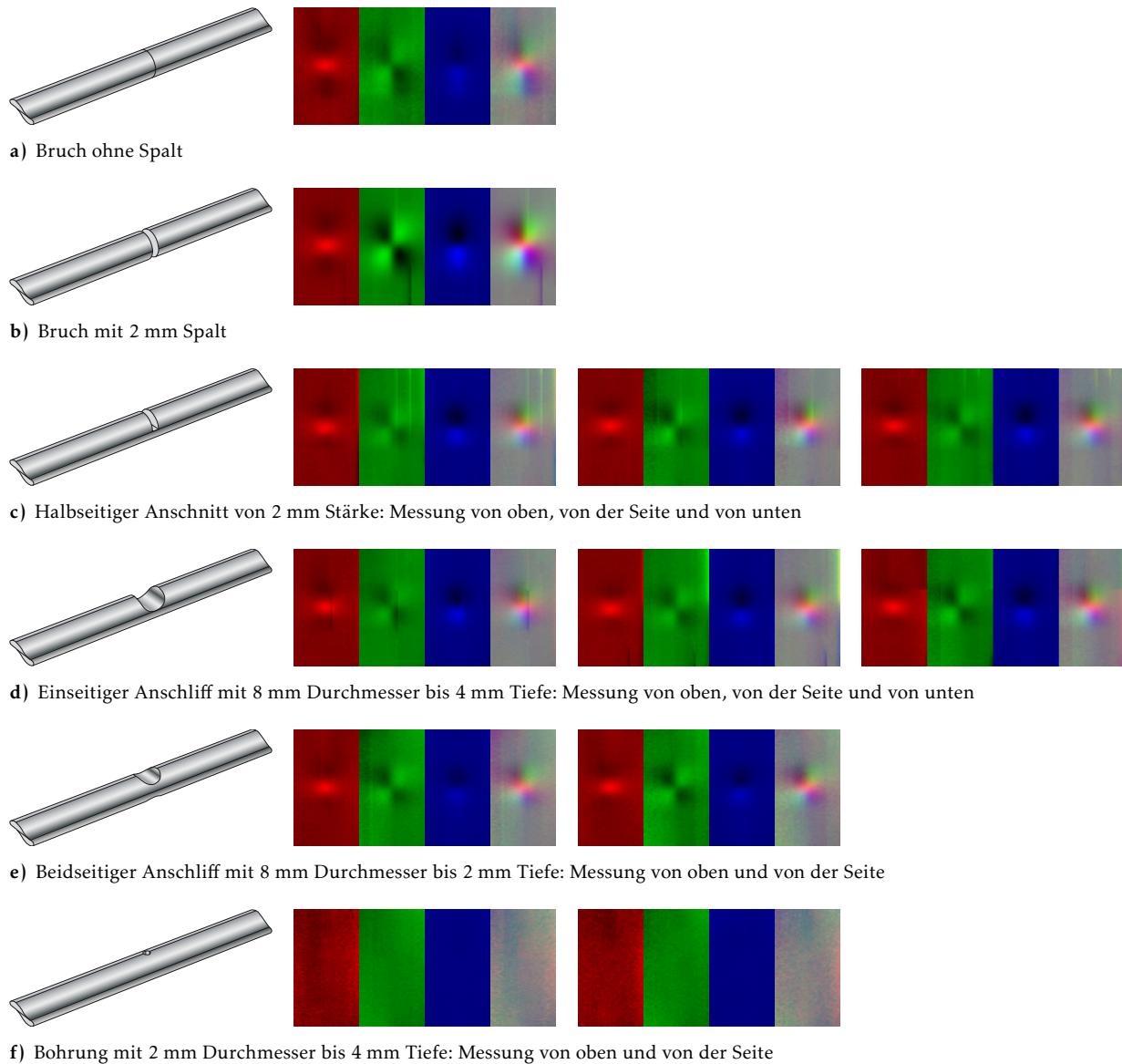


Abb. 4.17 Untersuchung verschiedener Schadensarten per Aktivmessung

mögliche Schadensarten exemplarisch nachgebildet und gemessen. Die präparierten Stäbe haben einen Durchmesser von 8 mm und der Messabstand entspricht einer Überdeckung von 35 mm. Bei den Schäden handelt es sich um einen Bruch ohne Spalt, einen Bruch mit Spalt, einen halbseitigen Anschnitt, einen einseitigen Anschliff, einen beidseitigen Anschliff und eine Bohrung. Skizzen der Schadensarten und die Messergebnisse in Abhängigkeit der Ausrichtung des Schadens sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

Wie erwartet ergibt sich qualitativ kein Zusammenhang zwischen Schadens-
typ und Signal, sofern der Schaden – wie hier – als Materialverlust oder Quer-
schnittsunterbruch definiert ist. Unterschiede zeigen sich teilweise in der Si-
gnalstärke. So stechen die Bruchsignale, besonders bei dem Bruch mit Spalt, am
deutlichsten hervor. Das Bohrloch dagegen ist praktisch nicht detektierbar. Das
Messbild zeigt hier nur ein Rauschen. Quantitative Unterschiede zwischen den
anderen Schadensarten (Anschnitt, einseitiger Anschliff, beidseitiger Anschliff)

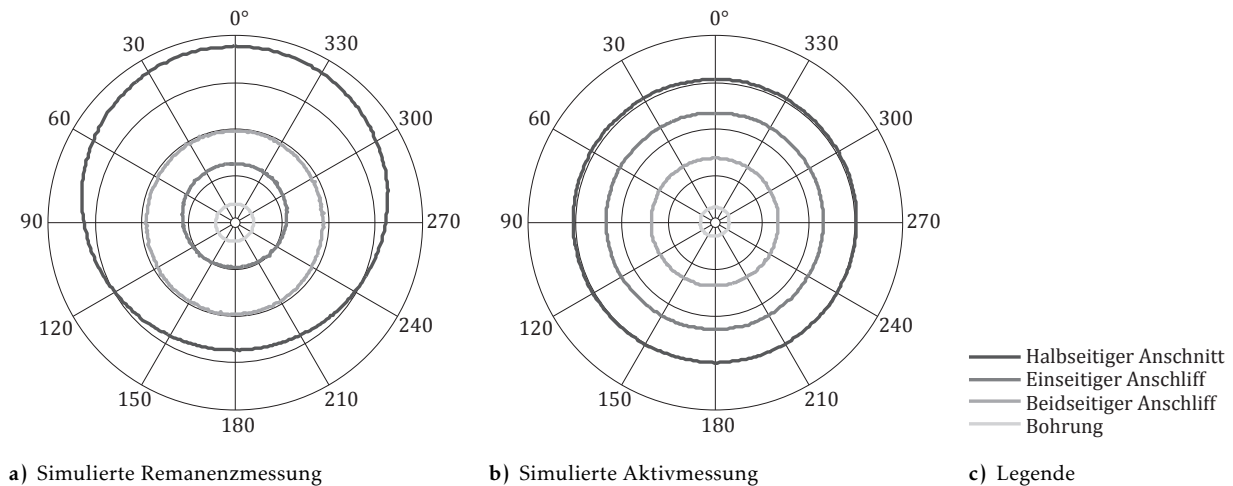


Abb. 4.18 Untersuchung verschiedener Schadensarten per Simulation

können mit den durchgeführten Messungen nicht erkannt werden. Auch bei einem Vergleich der Messungen mit unterschiedlicher Ausrichtung des Schadens kann kein Unterschied in der Signalstärke festgestellt werden. Dazu muss festgehalten werden, dass die Messtechnik nicht die nötige Präzision für einen Vergleich in Absolutwerten erreicht. Zudem optimiert die entwickelte Software den Kontrast dahingehend, dass auch schwache Signale gut sichtbar sind.

Während die Messung im Experiment mangels Empfindlichkeit der Sensoren nur mittels Aktivmessung erfolgte, wurde die gleiche Situation in der Simulation mit COMSOL Multiphysics als remanente und aktive Messung nachgebildet. Dabei wurde für die remanente Simulation eine gleichmässige Magnetisierung des Stabes angenommen. Die Entmagnetisierung als geometrischer Effekt sowie die Hysterese als Materialparameter wurden vernachlässigt. Für die aktive Simulation wurden Kerne und Spulen des Messwagens nachgebildet. Abbildung 4.18 bildet die Simulationsergebnisse für vier verschiedene Schadensarten ab. Dazu wird die Signalstärke in Abhängigkeit der Orientierung des Schadens dargestellt.

Während die Signalstärke im remanenten Fall sehr stark von der Orientierung des Schadens abhängig ist, kann diese im aktiven Fall praktisch vernachlässigt werden. Die Simulation stützt damit eine Erkenntnis, die im Experiment mangels Genauigkeit nur vermutet werden konnte.

Die Signalstärke ist stark abhängig von geometrischen Grössen wie beispielsweise der Spaltbreite bei einer Stabunterbrechung, dem Materialverlust oder der verbleibenden Querschnittsfläche. Es ist auch nicht näherungsweise möglich, die Signalstärke eines Schadens auf einen einzigen Parameter zurückzuführen. Ordnet man die vier in der Simulation untersuchten Schadensarten nach ihrer Stärke, so ergibt sich für die Remanenzmessung eine andere Reihenfolge als für die Aktivmessung. Das zeigt, dass auch die Art des Messverfahrens eine bedeutende Rolle für die Signalstärke spielt.

4.7 Abgrenzung Schadsignal zu intakter Bewehrung

Ein Bruchsignal kann, wie in Kapitel 4.2 gezeigt, als Kombination von Stabanfangs- und Stabendsignal hergeleitet werden. Aus dieser Natur des Bruchsignals ergibt sich eine Verwechslungsgefahr mit Mustern von intakter Bewehrung, da Stabanfänge und Stabenden in einem Bewehrungslayout üblich sind, etwa bei Zulagen oder Stößen.

In Abbildung 4.19 wird daher ein Vergleich von fünf unterschiedlichen Anordnungen gezeigt. Dabei wurden die Signale simuliert, um klare Bilder ohne Störsignale zeigen zu können. Die Unterscheidung der Anordnungen für einen Bruch, Doppelbruch, Stoss, Stabanfang und Stabende ist dabei eindeutig aus den simulierten Messbildern möglich. Der Einfluss von Störsignalen, wie sie in der Praxis vorkommen und auch nicht vermeidbar sind, wird bei der Anwendung der Methode bei den Ermüdungsversuchen und Feldversuchen thematisiert.

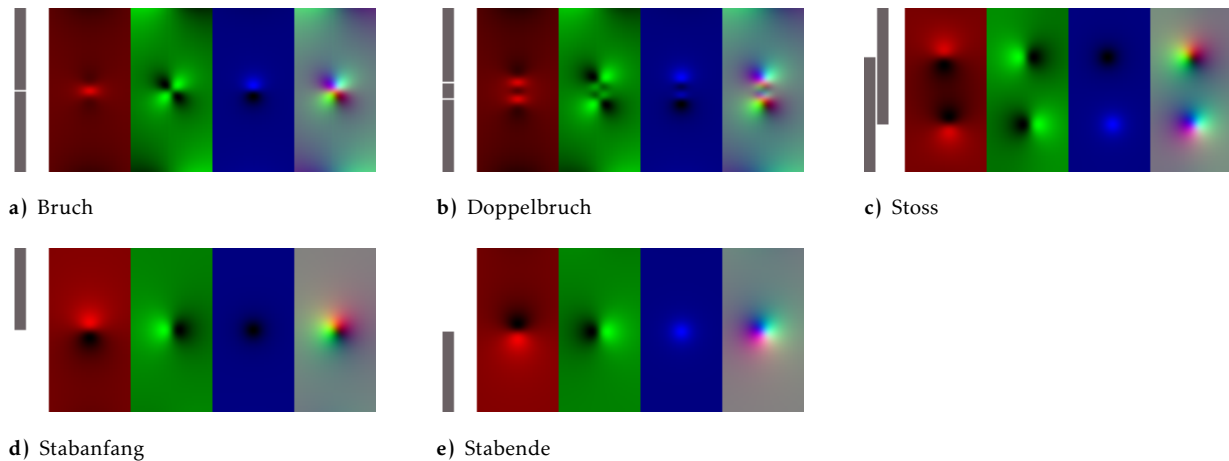


Abb. 4.19 Vergleich unterschiedlicher Signale

5 Geräteentwicklung und Messapparatur

Das Ziel, ein ausreichend schnelles, präzises und zuverlässiges Messgerät zu konstruieren, das Aktivmessungen in angemessener Breite durchführen kann, hat zahlreiche technische und konstruktive Fragestellungen aufgeworfen. Einige Herausforderungen waren von Anfang an offensichtlich, andere zeigten sich erst im Verlauf der Entwicklungsarbeit. Die Entwicklung erfolgte in vielen Zwischenschritten, von denen die Meilensteine im Folgenden beschrieben werden. Dabei werden die Überlegungen dargelegt, die zum jeweils nächsten Prototypen führten, die neuen Erkenntnisse und Probleme beschrieben, aber auch Fehlschläge und Sackgassen dokumentiert.

5.1 Messwagen Wolf remanent

Als Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung des Messkonzeptes stand der Messwagen von [WOLF 2012] zur Verfügung, wie in Abbildung 5.1 abgebildet.

Bei der Konzeption des Messwagens setzte [WOLF 2012] konsequent nicht-ferromagnetische Materialien ein. So besteht das Gestell aus Aluminium, die Gewindestangen sind aus Messing und die Räder aus Kunststoff gefertigt. Zur Positionsbestimmung kommt ein Drehgeber von Meuli Sensortechnik GmbH (Weiningen) zum Einsatz, der die Umdrehungen des Rades mittels optischer Abtastung misst. Zur Messung des Magnetfeldes in allen drei Richtungen ist ein MicroMag3 angebracht. Dieser ist höhenverstellbar, um den Messabstand zu variieren. Der Messwagen ist kabelgebunden. Zum Auslesen und Speichern von

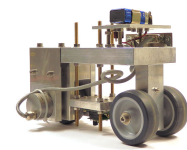
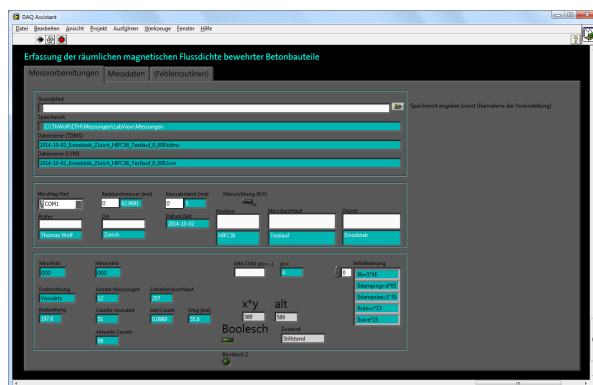
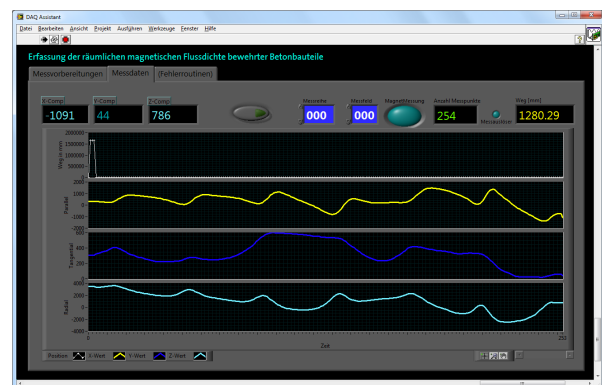


Abb. 5.1 Messwagen Wolf remanent



a) Eingabemaske für Metadaten



b) Echtzeitdarstellung der Messdaten

Abb. 5.2 Messwagen Wolf LabVIEW-Umgebung

Daten wurde in der grafischen Programmierumgebung LabVIEW ein Interface (Abb. 5.2) erstellt. Weitere Details und Kennzahlen können bei [WOLF 2012] nachgelesen werden.

5.2 Messwagen Wolf aktiv

Der bestehende Messwagen wurde provisorisch durch einen Elektromagnet erweitert (Abb. 5.3). Der Elektromagnet besteht aus einem Eisenkern mit quadratischem Querschnitt und zwei Spulen (Abb. 5.4). Die technischen Daten von Kern und Spule sind in Tabelle 5.1 dokumentiert.

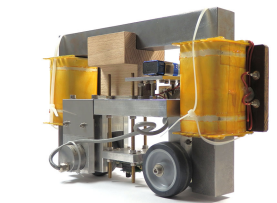


Abb. 5.3 Messwagen
Wolf aktiv



a) Magnetkern mit Spulen



b) Spule

Abb. 5.4 Provisorische
Magnetisierungsein-
richtung

Windungen pro Spule	2400
Maximale Stromstärke pro Spule	0,75 A
Widerstand kalt pro Spule	32,3 Ω
Widerstand warm pro Spule	34,3 Ω
Gewicht pro Spule	1,2 kg
Gewicht Kern	5,8 kg
Gewicht Kern und zwei Spulen	8,2 kg

Tab. 5.1 Technische Daten Messwagen Wolf aktiv

Mit diesem Versuchsaufbau konnte gezeigt werden, dass sich eine Aktivmessung grundsätzlich für die gegebene Problemstellung eignet. Da die Magnetisierungseinrichtung für diesen Vorversuch mithilfe von vorhandenen Spulen improvisiert wurde, ist sie in einigen Punkten nicht optimal: Der grosse quadratische Querschnitt bedingt einen ebenso grossen und massiven Eisenkern. Um den Eisenkern auf den vorhandenen Messwagen anzupassen, musste das Joch verhältnismässig hoch und lang gebaut werden. Da jede unnötige Distanz letztlich die Ausnutzung des magnetischen Flusses reduziert, ist der Nutzen im Verhältnis zum Gewicht hier eher gering. Die Magnetisierungseinrichtung erwies sich jedoch im Versuch absolut gesehen als stark genug.

Problematisch waren die verbauten Magnetometer vom Typ MicroMag3, die zwar grundsätzlich sehr präzise und rauscharm arbeiten, vom Messbereich her jedoch für eine Aktivmessung unzureichend sind. Bei einer Aktivmessung unter einem Jochmagnet wirkt ständig ein Feld in Längsrichtung auf die Sensoren. Damit die Magnetometer nicht übersteuerten, mussten die Spulen unterhalb ihrer maximalen Stromstärke betrieben werden.

5.3 Prototyp 1 Hall analog

Beim Messwagen Wolf wurde zum Auslesen der Sensoren und zur Übertragung der Daten auf eine Hardwarelösung von National Instruments zurückgegriffen und die Echtzeitanzeige und Speicherung der Daten mit der dazugehörigen Software LabVIEW umgesetzt. Aus Gründen der Hardwarekosten, aber auch

auf Grund des Volumens der benötigten Hardware, wurde ein neues Konzept entwickelt.

Um einen funktionierenden Prototypen auch möglichst günstig reproduzieren zu können, wird als Alternative zur bisherigen Hardware auf die quelloffene Arduino-Plattform zurückgegriffen. Für diesen Prototyp kam dabei ein Arduino Mega zum Einsatz.

Notebookseitig sollten die nötigen Komponenten auf ein Minimum beschränkt werden. Ausserdem sollte die Datenübertragung vom Arduino zum Notebook drahtlos erfolgen. Hierfür wurden zwei gleiche Funkmodule vom Typ XBee verwendet, wobei eines über einen Shield mit dem Arduino Board verbunden ist, und das andere Funkmodul über ein USB-Dongle direkt an das Notebook angeschlossen wird. Auf dem Notebook werden die Daten über eine COM-Schnittstelle ausgelesen.

Damit ein Übersteuern der Sensoren auch bei stärkeren Magnetfeldern ausgeschlossen werden kann, stützt sich das Konzept dieses Prototyps auf analoge Hall-Sensoren, die einen deutlich grösseren Messbereich aufweisen als die Magnetometer des MicroMag3. Von der Empfindlichkeit her wäre ein Kompromiss zwischen der Präzision der Magnetometer und der Reichweite der Hall-Sensoren wünschenswert gewesen, was aber praktisch nicht verfügbar ist. Um dennoch auch aus den Hall-Sensoren Signale mit ausreichender Auflösung gewinnen zu können, wurde ein zusätzlicher AD-Wandler eingesetzt, der die Spannung der analogen Sensoren in ein digitales Signal mit 16-Bit Auflösung umwandeln kann.

Insgesamt wurden drei Hall-Sensoren vom Typ Allegro A1324 verbaut, einer für jede Koordinatenrichtung.

Der zurückgelegte Weg des Gerätes wird von einem Drehgeber mit optischer Abtastung gemessen.

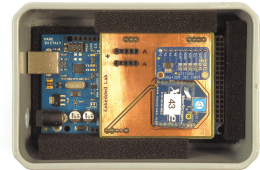
Hauptplatine	Arduino Mega
AD-Wandler	ADS1115 16-Bit ADC
Hall-Sensoren	Allegro A1324
Funkverbindung	XBee
Drehgeber	Kübler Miniatur, optisch 2400 inkremental
Spule und Kern	wie Messwagen Wolf aktiv (Tab. 5.1)

Tab. 5.2 Technische Daten Prototyp 1 Hall analog

Das Hardwarekonzept, sowie die Software des Arduino Boards wurde von Christoph Wartmann vom EmbeddedLab entwickelt. Die Gesamtansicht ist Abbildung 5.5 dargestellt, die Komponenten in Abbildung 5.6. Eine Auflistung der Komponenten und Eigenschaften findet sich in Tabelle 5.2.



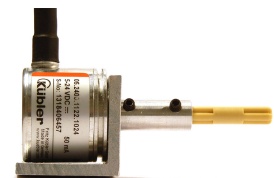
Abb. 5.5 Prototyp 1 Hall analog



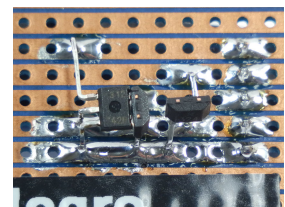
a) Steuerungseinheit mit Arduino-Board, Mikroprozessor, AD-Wandler und Funkmodul



b) Funkmodul mit USB-Schnittstelle zum Computer



c) Drehgeber mit Lego Technic-Welle



d) Hall-Sensoren in Nahaufnahme

Abb. 5.6 Prototyp 1 Hall analog: Komponenten



Abb. 5.7 Auswechselbare
Platinen mit je drei
Hall-Sensoren

5.3.1 Vergleich analoger Hall-Sensoren

Von den analogen Hall-Sensoren, die nach Form und Spezifikationen in Frage kamen, wurden fünf lieferbare (Abb. 5.7) evaluiert. Dabei wird in Abbildung 5.8 für jeden der Sensoren eine Rauschmessung, eine Einzelmessung und eine Flächenmessung dargestellt. Die Rauschmessungen und die Einzelmessungen sind dabei für alle Sensoren im gleichen Massstab. Die Rauschmessungen sind gegenüber den Einzelmessungen zehnfach überhöht.

Da die Hall-Sensoren generell sehr unempfindlich sind, wird tendenziell ein empfindlicher Sensor bevorzugt. Die Hersteller geben die Empfindlichkeit in mV/G an. Diese Empfindlichkeitsangabe deckt sich mit der Standardabweichung der Einzelmessungen. Dabei wurde für jeden Sensor die gleiche Messreihe gefahren und die Standardabweichung der Messwerte berechnet. Diese sollte möglichst hoch sein. Dazu wurde eine Messung im Stand bei unverändertem Feld durchgeführt. Bei dieser Messung wird das Rauschen gemessen. Die Standardabweichung des Rauschen sollte möglichst gering sein. Von den evaluierten Sensoren ist der Allegro A1324 am besten geeignet. Selbst mit dem stark rauschenden Honeywell SS495A1 sind jedoch noch aussagekräftige Bilder möglich. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

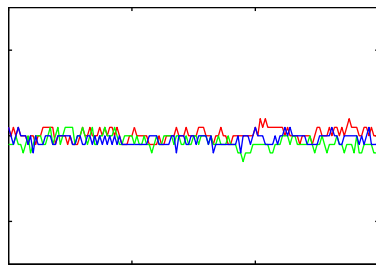
Hersteller	Allegro	Allegro	Allegro	Allegro	Honeywell
Bezeichnung	A1302	A1324	A1325	A1384	SS495A1
Rauschmessung σ_x	0,76	0,61	0,64	1,55	3,55
Rauschmessung σ_y	0,77	0,58	0,66	1,37	3,93
Rauschmessung σ_z	0,70	0,59	0,67	1,28	4,41
Einzelmessung σ_x	7,00	32,4	16,5	7,98	15,9
Einzelmessung σ_y	7,22	26,9	18,3	8,79	17,2
Einzelmessung σ_z	20,9	86,9	50,8	23,7	48,0
Empfindlichkeit lt. Hersteller in [mV/G]	1,3	5,0	3,125	1,4	3,125

Tab. 5.3 Vergleich analoger Hall-Sensoren

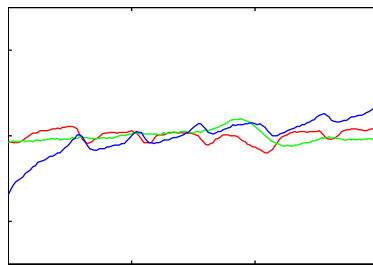
5.4 Prototyp 5 Hall analog

Mit dem Ziel, die Messeinrichtung breiter zu gestalten, wurde ein weiterer Prototyp (Abb. 5.9) entwickelt. Die elektronischen Komponenten (Abb. 5.10) sind dabei die gleichen wie beim vorherigen Prototypen, mit dem Unterschied, dass zwei statt ein AD-Wandler verbaut wurden. Dies ist nötig, um die Spannungen der insgesamt 15 analogen Hall-Sensoren, jeweils 5 pro Koordinatenrichtung, zu messen. Aufgrund der Auswertungen am vorhergehenden Prototypen (Tab. 5.3) wurden Sensoren vom Typ Allegro A1324 verbaut.

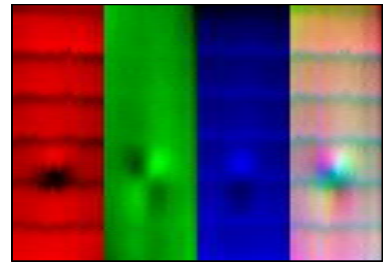
Wie schon beim vorherigen Prototypen wurde das Hardwarekonzept sowie



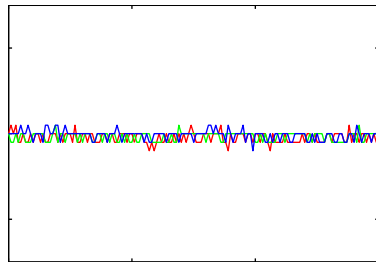
a) A1302 Rauschmessung



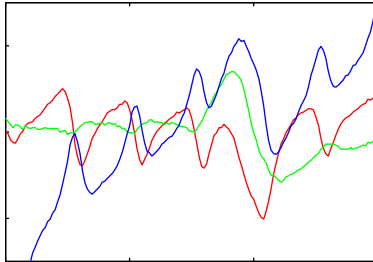
b) A1302 Einzelmessung



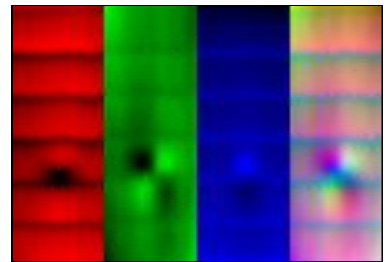
c) A1302 Flächenmessung



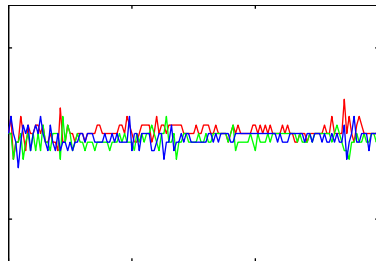
d) A1324 Rauschmessung



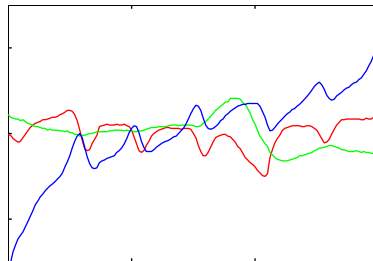
e) A1324 Einzelmessung



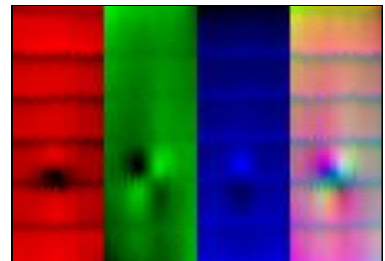
f) A1324 Flächenmessung



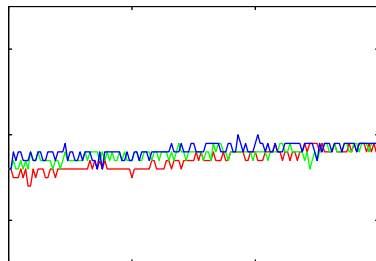
g) A1325 Rauschmessung



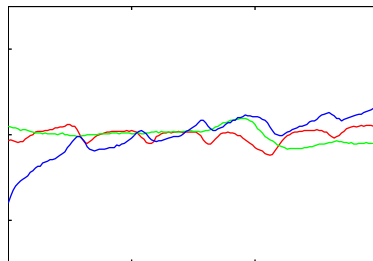
h) A1325 Einzelmessung



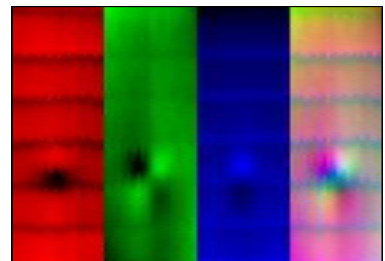
i) A1325 Flächenmessung



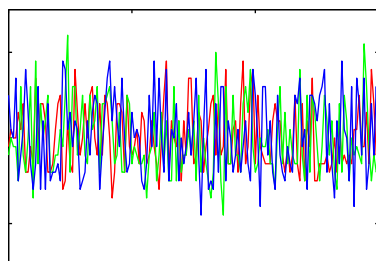
j) A1384 Rauschmessung



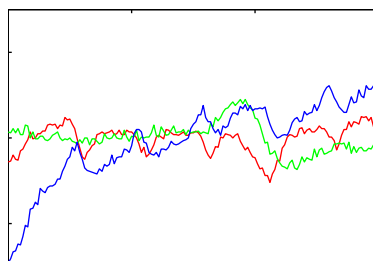
k) A1384 Einzelmessung



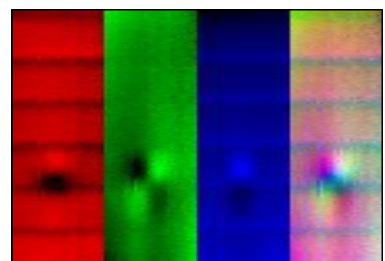
l) A1384 Flächenmessung



m) SS495A1 Rauschmessung

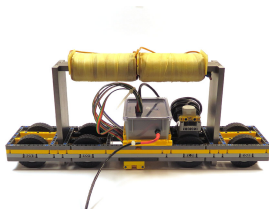


n) SS495A1 Einzelmessung

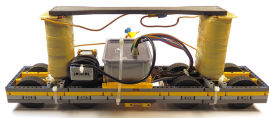


o) SS495A1 Flächenmessung

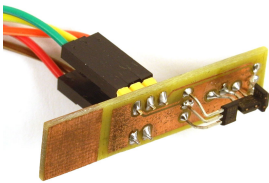
Abb. 5.8 Vergleich analoger Hall-Sensoren



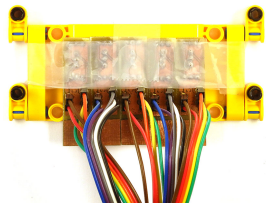
a) Variante Spulen oben



b) Variante Spulen vorne und hinten

Abb. 5.9 Prototyp 5 Hall analog

a) Eine von fünf Sensorplatten



b) Array aus fünf Sensorplatten



c) Steuerungseinheit mit Arduino-Board, Mikroprozessor, AD-Wandler und Funkmodul

Abb. 5.10 Prototyp 5 Hall analog: Komponenten

die Software des Arduino Boards von Christoph Wartmann vom EmbeddedLab entwickelt.

Da dieser Prototyp bereits über eine Breite von ca. 5 cm messen konnte, sollte ein möglichst gleichförmiges Magnetfeld entlang dieser Messbreite gewährleistet sein. Es wurden entsprechend breite und flache Spulen entworfen. Die Berechnung und Wickelung der Spulen wurde von Siegfried Kroh von der Firma Trafo Berg aus Wuppertal vorgenommen.

Für den Kern, der jeweils zwei Spulen trägt, wurden zwei Varianten gebaut: Bei der ersten Variante wurden die Spulen oben angeordnet. Diese Variante wurde nicht mehr weiterverfolgt. Die Alternative, bei der die Spulen vorne und hinten angebracht wurden, wurde auch für den folgenden Prototypen benutzt. Die technischen Daten dieser Konstruktion sind in Tabelle 5.4 dokumentiert. Im folgenden Kapitel werden einige Details der Kerne näher betrachtet.

Windungen pro Spule	690	
Maximale Stromstärke pro Spule	5,0	A
Widerstand kalt pro Spule	1,45	Ω
Widerstand warm pro Spule	1,85	Ω
Breite Kern innerhalb Spule	40	mm
Höhe Kern innerhalb Spule	10	mm
Gewicht pro Spule	1,6	kg
Gewicht Kern	1,9	kg
Gewicht Kern und zwei Spulen	4,1	kg

Tab. 5.4 Technische Daten Prototyp 5 Hall analog

5.4.1 Entwurf der Kerne

Der Prototyp 5 Hall analog ist innerhalb dieser Arbeit der erste Prototyp, mit dem in einem Zug eine flächige Messung vorgenommen werden konnte. Die Magnetisierungseinrichtung muss dabei der neuen Messbreite angepasst sein.

Die remanente Magnetisierung mittels Permanentmagnet ist, wenn sie stabweise durchgeführt wird (Kap. 4.1), für eine flächige Magnetisierung nicht geeignet. Versucht man, ein gesamtes Bewehrungslayout zu magnetisieren, indem man es Stab für Stab mit einem Permanentmagnet abfährt, so ist schlussendlich nur die Magnetisierung des einen Stabes brauchbar, der als letztes magnetisiert wurde. Die Magnetisierung der anderen Stäbe wird genau in dem Moment abgeschwächt, wenn der Permanentmagnet über den Nachbarstab geführt wird.

In dieser Arbeit wird schwerpunktmässig das Konzept der Aktivmessung verfolgt. Eine Aktivmessung kann prinzipiell auch innerhalb eines Joches durchgeführt werden, welches aus Permanentmagneten besteht, wie beispielsweise [SZIELASKO *et al.* 2015] mit dem System BetoFlux gezeigt hat. In dieser Arbeit wird ein Konzept bestehend aus Eisenkern und Spulen verfolgt.

Für den Prototyp 5 Hall analog wurden zwei Varianten von Kernen gefertigt. Bei der einen Variante wurden zwei Spulen oben hintereinander aufgereiht, bei der anderen Variante wurde je eine Spule vorne und eine hinten angebracht. Um den Charakter des resultierenden Magnetfeldes zu veranschaulichen, wurden beide Geometrien mit COMSOL Multiphysics simuliert.

Der Kern besteht aus jeweils drei Teilen, die an ihren Verbindungsstellen teilweise ineinander ragen und verschraubt sind. Die Verbindung der einzelnen Kernstücke stellt eine grosse Unsicherheit in der simulierten Situation dar, weshalb jeweils zwei Annahmen simuliert wurden: Nimmt man an, dass sich die Konstruktion wie ein einziges monolithisches Kernstück verhält, so werden sämtliche Verluste an den Verbindungsstellen vernachlässigt. Der tatsächlich nutzbare magnetische Fluss ist dann kleiner als der simulierte. Nimmt man dagegen an, dass über die gesamte Verbindungsstelle eine eingeschränkte Permeabilität wie in einem durchgehenden Luftspalt herrscht, so werden die Verluste in der Simulation tendenziell überschätzt. Der tatsächlich nutzbare Fluss wäre dann grösser als der simulierte.

Die Realität liegt zwischen beiden simulierten Annahmen. Durch die gute Oberflächenqualität an der Kontaktstelle und dadurch, dass die Verschraubung Spannung zwischen den Bauteilen erzeugt, wird der vorhandene Luftspalt um einen unbekannten Anteil reduziert. Die Verbindungsstellen sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

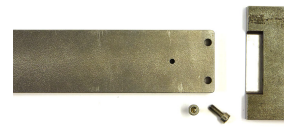
Die Simulationsergebnisse sind aus Abbildung 5.12 ersichtlich. Visualisiert ist die magnetische Feldstärke in x-Richtung, wobei stark positive Felder in dunkelrot und stark negative in dunkelblau dargestellt werden. Die Skalierung ist dabei in allen Simulationen und Schnitten der Abbildung die gleiche.

Vergleicht man die Variante mit den Spulen oben mit der Variante mit den Spulen vorne und hinten in der Seitenansicht (xz-Ebene), so zeigt sich, dass bei der ersten Variante auch ausserhalb des Joches stärkere Felder wirken, während sich die Felder bei der zweiten Variante auf das innere des Joches konzentrieren, wie es auch beabsichtigt ist.

Mit beiden Varianten lässt sich auf der Ebene der Bewehrung (xy-Ebene) zwar kein homogenes, aber ein hinreichend gleichmässiges Feld erzeugen. Dies ist nötig, um über die gesamte Messbreite zuverlässig Brüche detektieren zu können.

Beide Varianten haben allerdings vergleichsweise hohe Feldstärken auf Höhe der Sensoren. Messtechnisch ist es eine Herausforderung, innerhalb dieses hohen Feldes die kleinen Abweichungen in der Feldstärke zu registrieren, die von einem Streufeld ausgehen.

Kritisch ist das Detail der Verbindung: Für die Nutzbarkeit des magnetischen Flusses ist es relevant, ob die Verbindung der Kernteile mehr einer monolithischen Verbindung entspricht oder aber einer Verbindung mit einem durchgehenden Luftspalt.

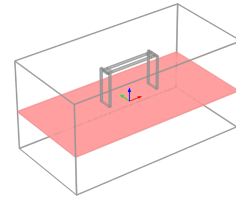
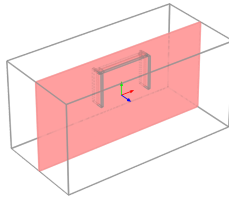
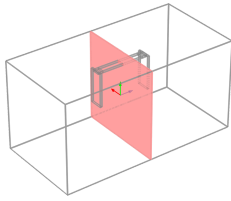


a) Variante Spulen oben

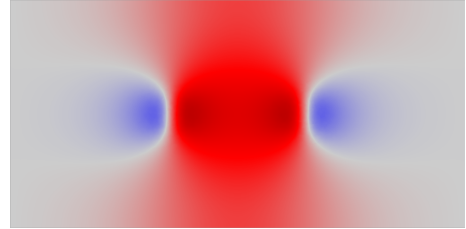
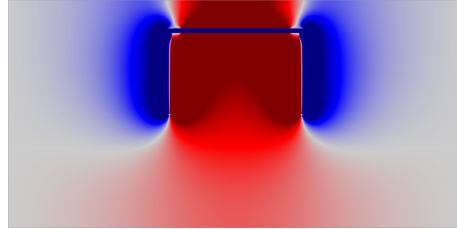
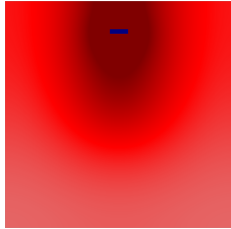


b) Variante Spulen vorne und hinten

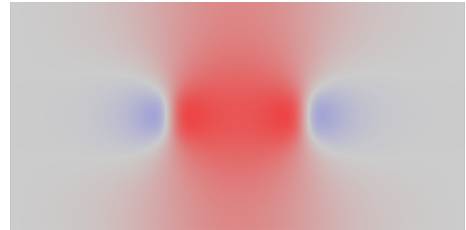
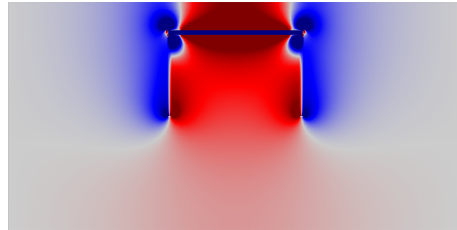
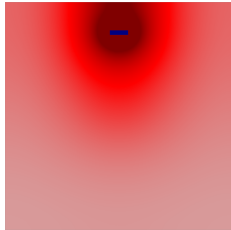
Abb. 5.11 Prototyp 5 Hall analog: Detail der Kernverbindung



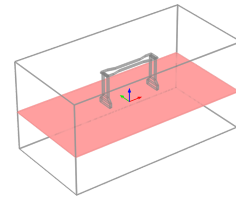
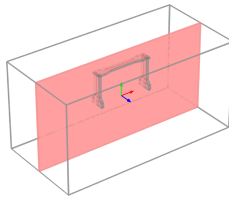
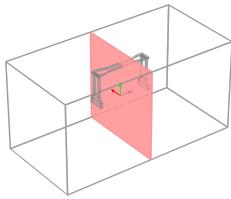
a) Variante Spulen oben: Schnitt in yz-, xz- und xy-Ebene



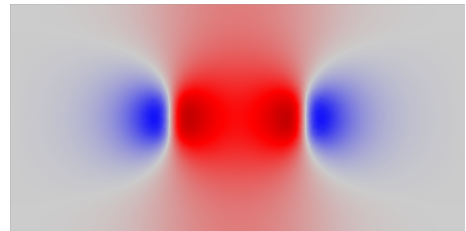
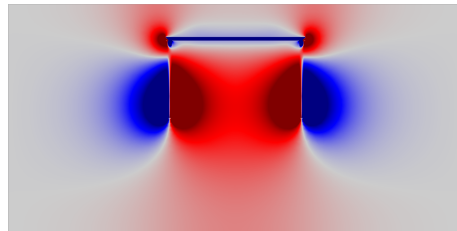
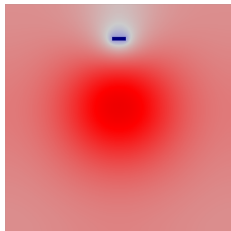
b) Variante Spulen oben: Annahme einer monolithischen Kernverbindung



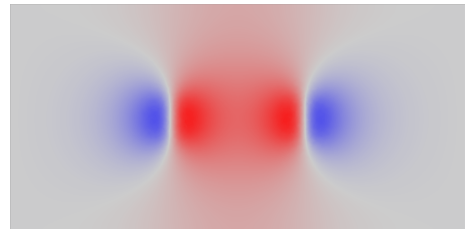
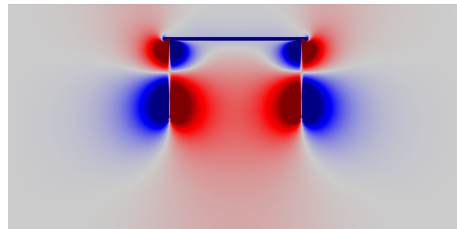
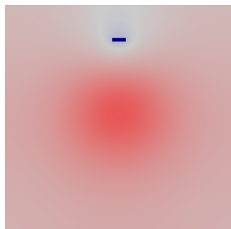
c) Variante Spulen oben: Annahme einer Kernverbindung mit Luftspalt



d) Variante Spulen vorne und hinten: Schnitt in yz-, xz- und xy-Ebene



e) Variante Spulen vorne und hinten: Annahme einer monolithischen Kernverbindung



f) Variante Spulen vorne und hinten: Annahme einer Kernverbindung mit Luftspalt

Abb. 5.12 Vergleich zweier Kern-Entwürfe mittels Comsol Simulation

5.5 Prototyp 20 Hall digital

Die Erfahrungen mit den vorhergehenden Prototypen legten sowohl Detailverbesserungen, als auch grundlegende Änderungen nahe. Die Probleme und deren Lösungsansätze werden im Folgenden beschrieben.

Gelöst wurde ein Problem bei der Positionsbestimmung. Verbaut ist ein Drehgeber, der als Relativdrehgeber funktioniert, also ständig die neue Position relativ zur letzten Position ausgibt. Dieser Drehgeber müsste ständig abgefragt werden, damit keine Positionsänderungen verpasst werden. Da der Arduino nur sequenziell und nicht parallel arbeiten kann, gehen die Informationen zu Positionsänderungen zu den Zeiten verloren, in denen die Hall-Sensoren ausgelesen werden oder ein Sendevorgang zum PC erfolgt. Als Lösung wurde ein Zählerchip zwischengeschaltet, der alle Positionsänderungen registriert und somit aus dem Relativdrehgeber quasi einen Absolutdrehgeber macht.

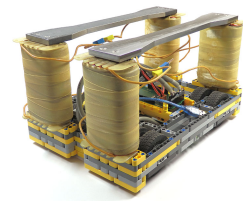
Die Übertragung der Messdaten per Funk ist stabil und hat sich grundsätzlich bewährt. Der Einfachheit halber wurden die Messdaten bei den vorherigen Prototypen in ASCII-Kodierung übertragen, was zwar eine einfache Fehlerkontrolle ermöglicht, die übertragene Datenmenge aber unnötig vergrößert. Bei diesem Prototypen wurde daher zum einen der Messbereich reduziert. Der Messbereich der y- und z- Komponenten kann wesentlich schmaler gewählt werden als der der x-Komponente, da hier ein starkes Grundfeld wirkt. Zum anderen werden die Daten binär übertragen, was wesentlich weniger Übertragungskapazität benötigt. Die Kontrolle wird über eine Prüfsumme vorgenommen.

Das bisherige Verfahren mit analogen Hall-Sensoren lieferte zwar rauscharme Messwerte, war allerdings bezüglich der Auslesegeschwindigkeit nicht auf die gewünschte Anzahl von 20 3D-Sensoren skalierbar. Daher wurde ein Konzept mit digitalen Hall-Sensoren entwickelt, wobei erst 10 und später 20 Chips zum Einsatz kamen. Jeder dieser Chips verfügt intern über drei Hall-Sensoren und lässt sich digital über eine SPI-Schnittstelle auslesen. Bedingt dadurch wurde ein Konzept mit digitalen Sensoren weiterverfolgt.

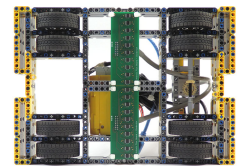
Die Planung der nötigen Platinen und die Programmierung des Arduinos wurden vom ETH-Studenten Laurin Diener vorgenommen. Es wird eine Messfrequenz von 37 Hz erreicht. Der Prototyp ist in Abbildung 5.13 dargestellt und die verwendete Hardware in Tabelle 5.5 aufgelistet.

Hauptplatine	Arduino Due
Hall-Sensoren	Melexis MLX90363
Funkverbindung	XBee Pro
Drehgeber	Kübler Miniatur, optisch 2400 inkremental
Spule und Kern	2x wie Prototyp 5 Hall analog (Tab. 5.4)

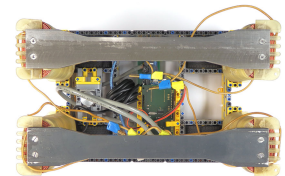
Tab. 5.5 Technische Daten Prototyp 20 Hall digital



a) Gesamtansicht



b) Untersicht



c) Obersicht

Abb. 5.13 Prototyp 20 Hall digital

5.5.1 Superpositionsprinzip

Bereits in Kapitel 4.3 wurde dargelegt, dass das Superpositionsprinzip allenfalls qualitativ anwendbar ist, nicht jedoch mit mathematischer Präzision. Mit dem Prototyp 20 Hall digital wurde die Messbreite gegenüber dem vorherigen Prototypen erhöht. Anhand eines Beispiels soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen die Ungültigkeit des Superpositionsprinzips bei einer Erhöhung der Messbreite haben kann.

Gegeben ist der aktuelle Prototyp mit seinen zwei Eisenkernen. In der ersten simulierten Anordnung (Abb. 5.14a)) wird dieser über zwei Bewehrungsstäbe bewegt, die sich jeweils unter den Eisenkernen befinden. In der zweiten Anordnung (Abb. 5.14b)) befindet sich nur unter einem Eisenkern ein Bewehrungsstab, auf der anderen Seite ist Luft. Für beide Anordnungen wurde das Feld in x-Richtung simuliert für den Fall, dass die Bewehrungsstäbe intakt sind (dunkelroter Anteil) und das zusätzliche Feld für den Fall, dass ein Eisen gebrochen ist (hellroter Anteil). Die Feldstärke ist als Balkendiagramm dargestellt, wobei jeder Balken einen der 20 virtuellen Sensoren repräsentiert.

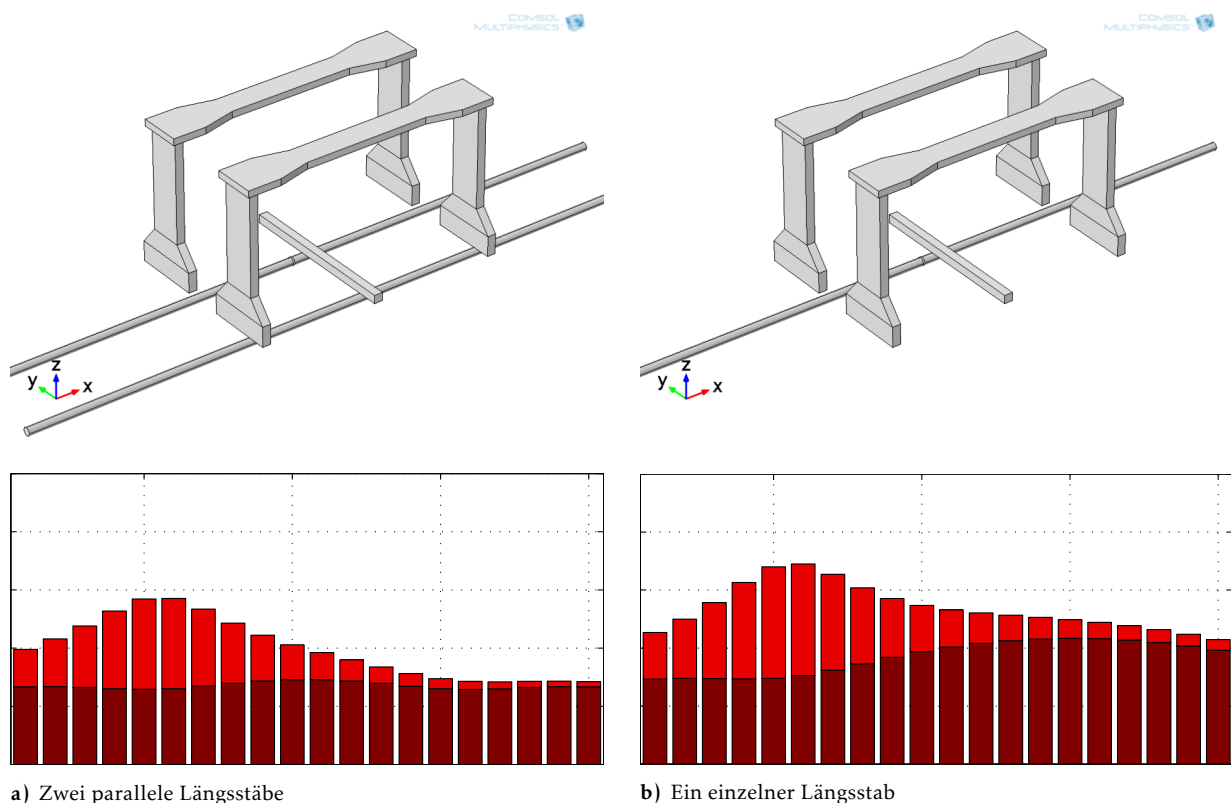


Abb. 5.14 Geometrieabhängige Umlagerung des Bruchsignals

Dass sich die Feldstärke zwischen beiden Anordnungen (dunkelroter Anteil) im Falle von intakten Stäben unterscheidet, ist offensichtlich. Dass allerdings die Stärke des Bruchsignals (hellroter Anteil) zwischen beiden Anordnungen variiert, bedarf einer Erklärung. Die Erklärung liegt in den Umlagerungen des magnetischen Flusses. Verlaufen wie in der ersten Anordnung zwei

Bewehrungsstäbe parallel, so lagert sich das Streufeld des Bruches in den intakten Stab um. Das Streufeld wird daher in der Messung schwächer wahrgenommen. Befindet sich jedoch wie in der zweiten Anordnung kein weiterer Bewehrungsstab neben dem gebrochenen Stab, so lagert sich auch das Feld des rechten Eisenkerns in den gebrochenen Stab um und verstärkt so das Streufeld.

Der beschriebene Effekt der Umlagerung ist grundsätzlich unerwünscht, da er den Rückschluss von Signalstärke auf das Schadensausmass erschwert, kann aber nicht gänzlich eliminiert werden. Die Entscheidung, zwei separate Eisenkerne zu verwenden, anstatt einen breiten, liegt darin begründet, die Umlagerungseffekte so weit wie möglich zu verringern.

5.6 Prototyp 20 Hall digital kernlos

Das Konzept eines Messwagens mit integrierten Spulen und Kernen bringt zwei Probleme mit, die bisher nicht hinreichend gelöst wurden:

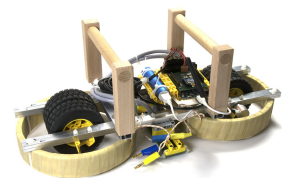
Die bisher verwendeten Kerne haben die Form und Charakteristik eines Jochmagnets. Dadurch wirkt ständig ein starkes Grundfeld auf die Sensoren, wobei die Messtechnik verhältnismässig kleine Abweichungen von diesem Grundfeld detektieren muss. Wie aus den Kapiteln 5.2 und 5.3 hervorgeht, mussten dabei Kompromisse bei der Wahl der Sensoren eingegangen werden. Durch eine Optimierung an dieser Stelle könnte das Rauschen der Messwerte weiter reduziert werden.

Das zweite Problem ist für die Praxis weitaus mehr relevant: Das hohe Gewicht der Spulen und Kerne macht das Arbeiten an Wänden oder über Kopf praktisch unmöglich. Auch bei kleineren Flächen ist es kaum möglich das Messgerät händisch so gerade und präzise zu führen, wie es für eine brauchbare Positionierung nötig wäre. Vergleichbare Konzepte wie beispielsweise [HILLEMEIER/WALTHER 2011] bedienen sich daher eines Schienensystems.

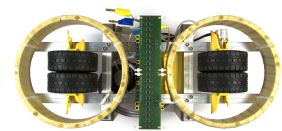
Ein Vorschlag von Mark Palynchuk von der Firma Western Instruments konnte bei beiden Problemen Abhilfe schaffen. Dieser Vorschlag wurde im Gespräch mit dem Autor bei der Konferenz des Canadian Institute for Non-destructive Evaluation in Edmonton 2015 geäussert:

Anstelle der Eisenkerne mit den dazugehörigen kompakten Rechteckspulen werden zwei kreisrunde Spulen verwendet. Ein Kern wird nicht benötigt. Der Durchmesser sollte möglichst gross gewählt werden. Die Spulen erzeugen ein gegen-gerichtetes Feld und werden so nahe wie möglich am Prüfkörper platziert. Der Prototyp, mit dem dieses Konzept umgesetzt wurde, ist in Abbildung 5.15 dargestellt.

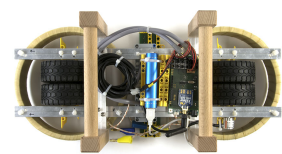
Die Simulationsergebnisse (Abb. 5.16) erlauben einen Vergleich des Grundfeldes zwischen dem doppelten Kern des bisherigen Prototyps und dem Konzept der kernlosen Spulen:



a) Gesamtansicht

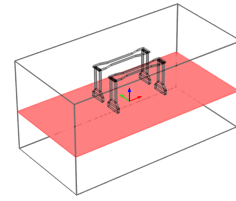
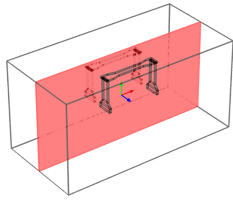
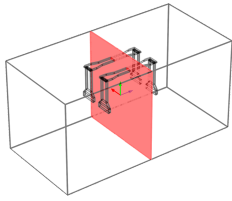


b) Untersicht

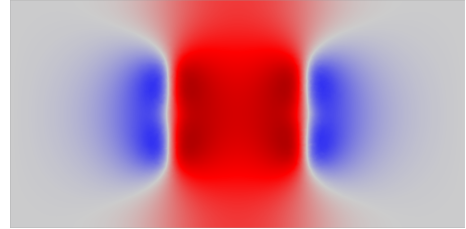
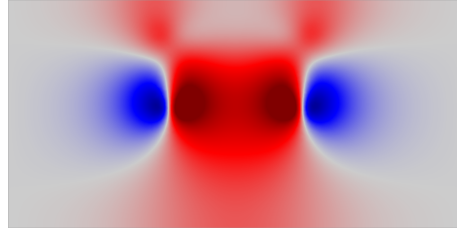
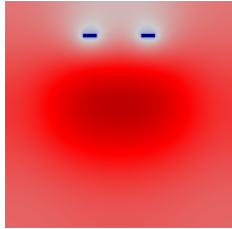


c) Obersicht

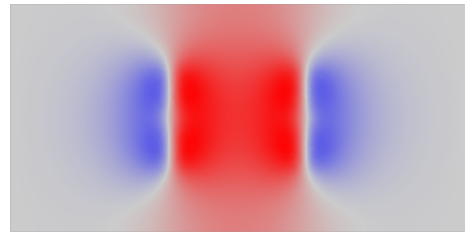
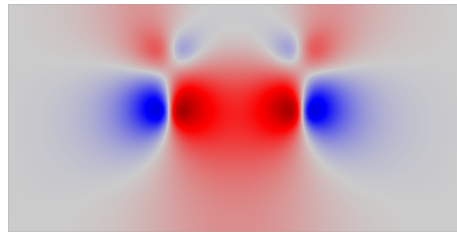
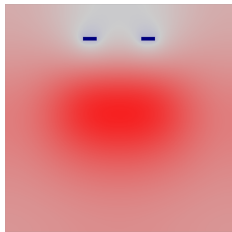
Abb. 5.15 Prototyp 20
Hall digital kernlos



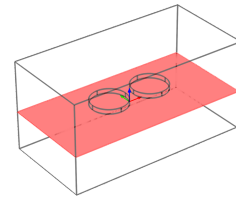
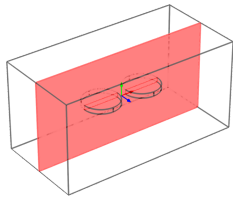
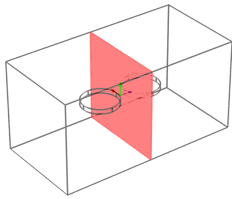
a) Variante Spulen mit Eisenkernen: Schnitt in yz-, xz- und xy-Ebene



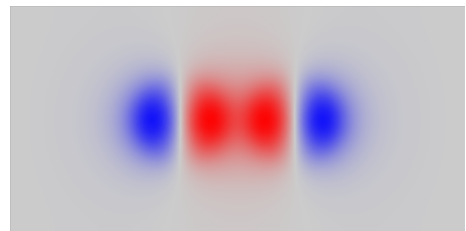
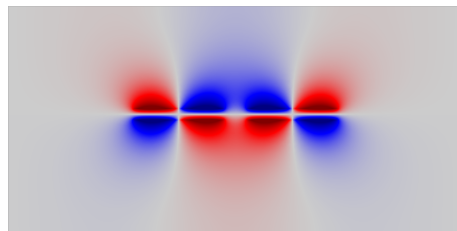
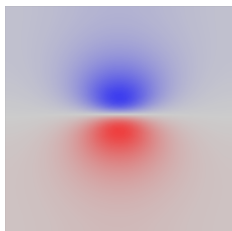
b) Variante Spulen mit Eisenkernen: Annahme einer monolithischen Kernverbindung



c) Variante Spulen mit Eisenkernen: Annahme einer Kernverbindung mit Luftspalt



d) Variante kernlose Spulen: Schnitt in yz-, xz- und xy-Ebene



e) Variante kernlose Spulen: Simulationsergebnisse

Abb. 5.16 Vergleich zwischen Doppelkern und kernlosen Spulen mittels Comsol Simulation

Gegenüber dem bisherigen Prototypen wirkt beim kernlosen Konzept praktisch kein Grundfeld auf die Sensoren. Das Feldmaximum verschiebt sich nach unten in Richtung der Bewehrung. Das messtechnische Problem kann dadurch wesentlich entschärft werden.

Ebenso konnte das Gewicht massgeblich reduziert werden. Gegenüber dem vorherigen Prototypen wiegt die Magnetisierungseinrichtung jetzt nur noch 2,2 kg anstelle von 8,2 kg. Die Gewichtsersparnis ergibt sich dabei nicht nur aus dem Wegfall der Kerne, sondern auch aus der weniger kompakten Bauweise. Dadurch, dass die runden Luftspulen eine grosse Oberfläche haben, kann die Abwärme besser abgegeben werden, so dass die Spulen mit einer grösseren Stromstärke betrieben werden können. Weitere Daten zu den Spulen sind aus Tabelle 5.6 ersichtlich. Die Messelektronik bleibt unverändert zum vorherigen Prototypen.

Windungen pro Spule	212	
Maximale Stromstärke pro Spule	5,0	A
Widerstand kalt pro Spule	2,99	Ω
Widerstand warm pro Spule	3,75	Ω
Innendurchmesser Spule	190	mm
Höhe Spule	40	mm
Drahtdurchmesser	1,0	mm
Gewicht Kupfer pro Spule	1,0	kg
Gewicht pro Spule	1,1	kg
Gewicht Konstruktion und zwei Spulen	3,7	kg

Tab. 5.6 Technische Daten Prototyp 20 Hall digital kernlos

Ein quantitativer Vergleich beider Konzepte mittels Simulation war nicht möglich, da die Konzepte zu unterschiedlich sind. Daher wurde beim Entwurf der Spulen die gewünschte Feldstärke möglichst hoch angesetzt. Dabei müssen grundsätzlich Kompromisse beim Gewicht und bei der Wärmeentwicklung eingegangen werden. Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Spulen auch kleiner dimensioniert werden könnten, wenn man Gewicht und Wärmeentwicklung weiter reduzieren wollte.

Bei der Verwendung von Luftspulen im Gegensatz zu Spulen mit Eisenkern ist zu beachten, dass sich ein wesentlich grösseres und weniger vorhersehbares Umgebungsfeld ergibt. Dies ist insbesondere für Personen mit Herzschrittmacher gefährlich.

6 Entwicklung der Software Streufeld

Um die Messdaten zu erfassen und nutzbar zu machen, wurde eigens eine Software entwickelt. Die Software basiert auf Java und ist damit grundsätzlich plattformunabhängig.

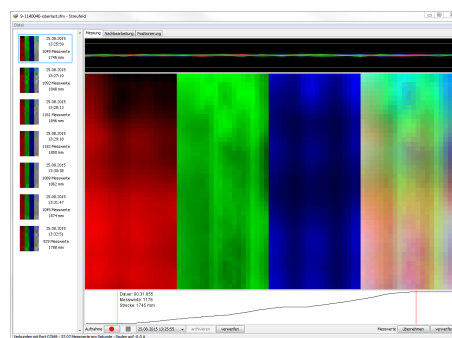
Das vorliegende Kapitel hat teilweise den Charakter eines Handbuches für den Anwender. Zwar werden die wenigsten Leser die beschriebene Software einmal selbst anwenden, dennoch sollen die Anwendungsmöglichkeiten und auch die Anwendungsgrenzen dargelegt werden. Teilweise hat dieses Kapitel auch den Charakter einer Dokumentation, indem es Problemstellungen und deren Lösungen herausarbeitet, die für den Anwender nicht unmittelbar von Belang sind, für die Weiterentwicklung aber entscheidend sein können.

Die Vorgehensweise gliedert sich in drei Schritte: Messen, Nachbearbeitung und Positionierung (Abb. 6.1).

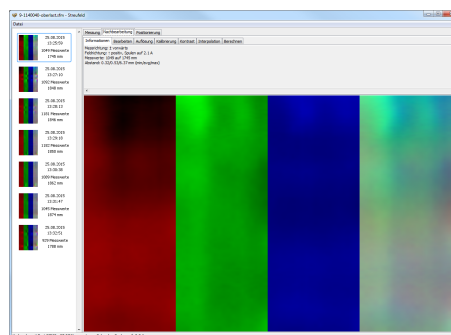
Für die *Messung* (Kap. 6.1) kann über die Statusleiste festgestellt werden, ob die Funkverbindung zum Messgerät erfolgreich hergestellt wurde. Eine schwankende Messfrequenz bzw. ein Aussetzen der Messung kann auf eine schwache Batterie oder eine zu grosse Distanz zwischen Sender und Empfänger hindeuten. Eine Echtzeitmessung über die Breite dient der Funktionskontrolle. Die eigentliche Messung kann in Echtzeit über die Fläche angezeigt werden oder mittels Aufnahmefunktion vorgenommen werden.

Die Messung kann übernommen werden und ist dann jederzeit in der Seitenleiste abrufbar, um etwa eine *Nachbearbeitung* (Kap. 6.2) durchzuführen. Dabei können die Bruchsignale in gewissen Grenzen deutlicher herausgearbeitet werden.

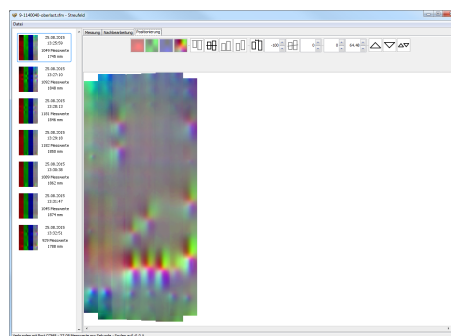
Wurden mehrere Messreihen gefahren, so können diese unter *Positionierung* (Kap. 6.3) zu einem Messbild zusammengefügt werden.



a) Schritt 1: Messen



b) Schritt 2: Nachbearbeitung



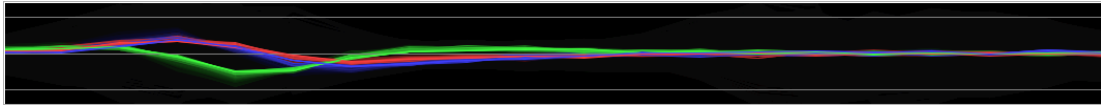
c) Schritt 3: Positionierung

Abb. 6.1 Überblick über die Software

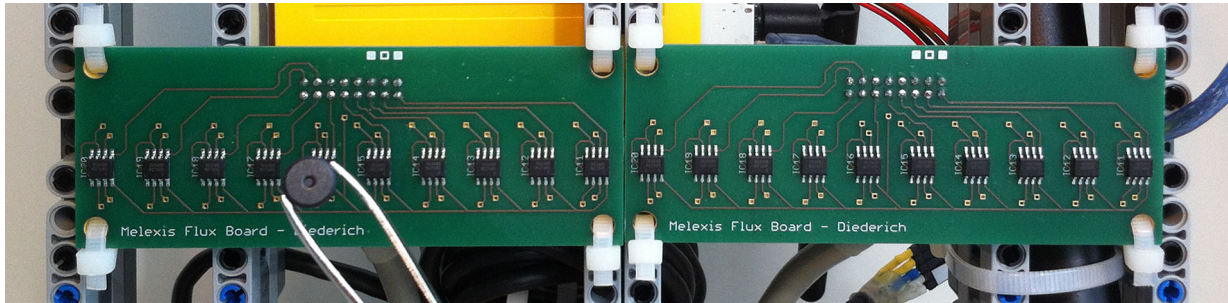
6.1 Messung

Die Messung ist der erste von drei Schritten. Hier werden die Messdaten vom Gerät gesammelt, drahtlos zum PC übermittelt und aufgezeichnet.

6.1.1 Echtzeitmessung über die Breite



a) Echtzeitanzeige des Messsignals über die Breite



b) Ursache des dargestellten Signals ist ein kleiner Wandmagnet

Abb. 6.2 Echtzeitmessung über die Breite

Sobald Verbindung zum Messwagen hergestellt wurde, wird das Messsignal in Echtzeit über die gesamte Breite angezeigt (Abb. 6.2). Dabei verhält sich die Anzeige leicht träge, sodass andeutungsweise auch der zeitliche Verlauf der Signale sichtbar ist.

Für das Diagramm läuft im Hintergrund permanent eine statistische Analyse der Messdaten. Dabei wird laufend, ohne die vollständige Datenreihe zu speichern, der Mittelwert und die Standardabweichung der Messwerte berechnet. Messwerte, die dem Mittelwert entsprechen, werden auf Höhe der Mittellinie eingezeichnet. Größere und kleinere Messwerte werden ober bzw. unterhalb der Mittellinie eingezeichnet, wobei die Skalierung nicht linear nach Signalstärke gewählt ist, sondern nach einer statistischen Grösse. Die beiden grauen Linien grenzen den Bereich von $\pm\sigma$ ein, der aktuelle Messwert befindet sich also mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% dazwischen. Dadurch ist diese Darstellung geeignet, sowohl feine, als auch grössere Signalausschläge anzuzeigen.

In der Praxis dient dieses Diagramm als Kontrolle für die korrekte Funktion des Messwagens. Mit einem Klick in das Diagramm kann die zugrundeliegende Statistik zurückgesetzt werden.

6.1.2 Echtzeitmessung über die Fläche

Sobald der Messwagen bewegt wird, wird die Messung aufgezeichnet und flächig in Echtzeit angezeigt (Abb. 6.3). Damit die Anzeige schnell und praktisch ohne Verzögerung funktioniert, kommt hier ein eher grober Algorithmus zum Einsatz.

Rollt der Messwagen während der Messung kurzzeitig etwas zurück, wird erst wieder bei Erreichen der vorherigen Position weiter aufgezeichnet.

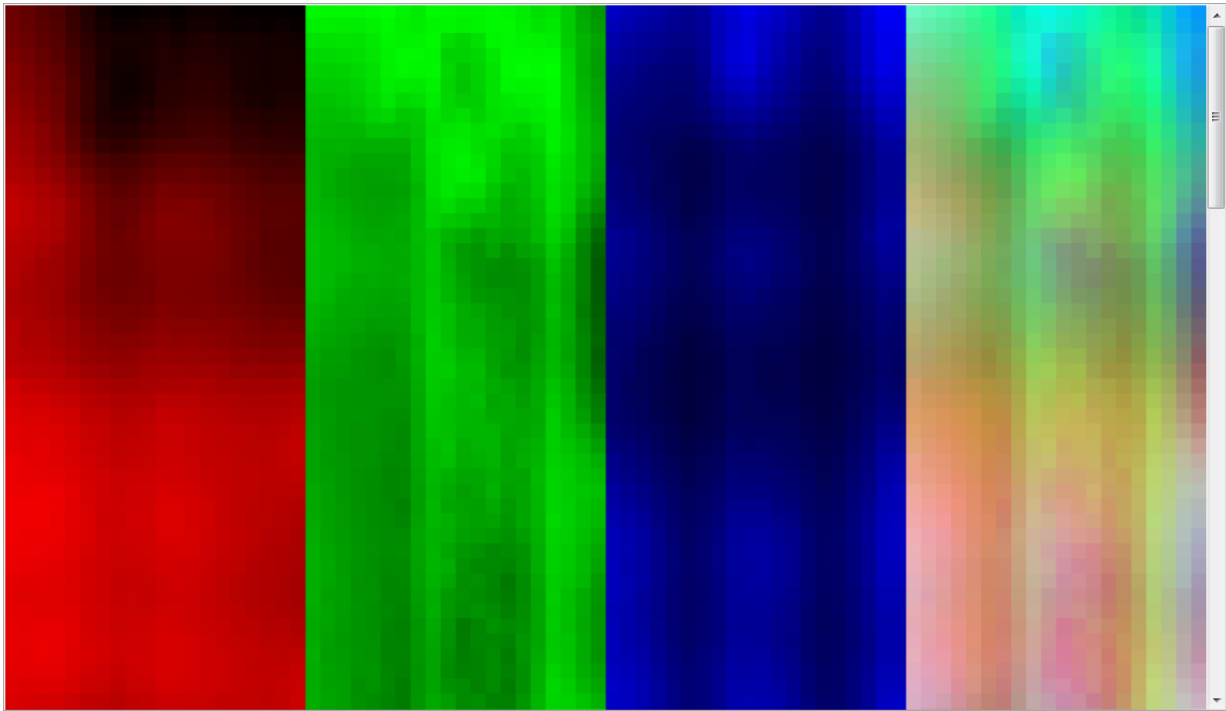


Abb. 6.3 Echtzeitmessung über die Fläche

Die aufgezeichnete Messreihe kann entweder übernommen werden, oder man verwirft sie, um eine neue Messreihe zu beginnen.

6.1.3 Aufnahmefunktion



Abb. 6.4 Aufnahmefunktion

Damit der Benutzer mehrere Messreihen am Stück fahren kann, ohne zwischen den Messreihen zum PC zurückkehren zu müssen, wurde eine Aufnahmefunktion implementiert (Abb. 6.4).

Während der Aufnahme ist die Echtzeitanzeige über die Fläche deaktiviert. Es wird lediglich der Weg-Zeit-Verlauf des Messgerätes mittels eines Graphen dargestellt. Wenn die Aufnahme gestoppt wird, kann die Aufnahme entweder komplett archiviert oder verworfen werden.

Um eine Messreihe aus der Aufnahme auszuschneiden, wird der Anfang der Messreihe mit der linken Maustaste markiert und erscheint als grüne Linie im Weg-Zeit-Verlauf. Das Ende der Messreihe wird mit der rechten Maustaste markiert und erscheint als rote Linie. Wenn Anfang und Ende markiert sind, erscheint die markierte Messreihe als Vorschau in der Flächendarstellung. Ebenfalls erhält man Informationen über die Messdauer, die Messstrecke und die Anzahl der Messwerte. Dies dient als Plausibilitätskontrolle, ob Messung

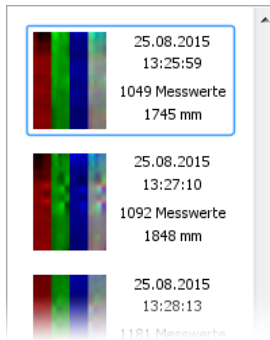


Abb. 6.5 Gespeicherte Messreihen in der Seitenleiste

und Markierung richtig vorgenommen wurden. Die markierte Messreihe kann zur weiteren Bearbeitung übernommen werden.

6.1.4 Gespeicherte Messreihen

Die aufgenommenen Messreihen können zur weiteren Bearbeitung gespeichert werden. Sie erscheinen dann mit einer Vorschau, der Messzeit und der Messlänge in der Seitenleiste (Abb. 6.5).

6.2 Nachbearbeitung

Nach der Messung findet in einem zweiten Schritt die Nachbearbeitung statt, um die Bruchsignale möglichst deutlich herauszuarbeiten.

6.2.1 Informationen

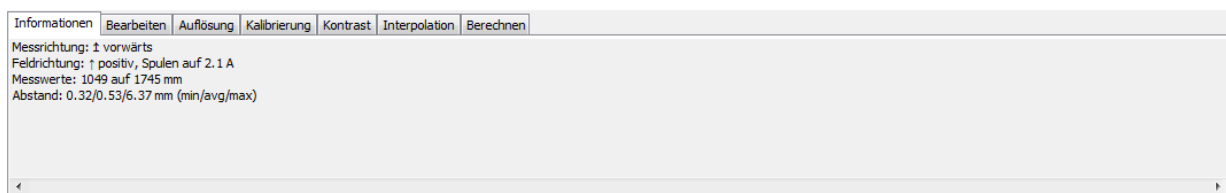


Abb. 6.6 Nachbearbeitung Informationen

Unter *Informationen* (Abb. 6.6) sind einige Werte aufgelistet, über die eine erste grobe Kontrolle der Güte der Messung durchgeführt werden kann.

Zunächst wird dort die Fahrtrichtung des Gerätes bei der Messung angegeben, die bei mehreren Messungen immer gleich sein sollte, damit die Messungen korrekt nebeneinander positioniert werden können. Ausserdem kann über die Feldrichtung kontrolliert werden, ob die Spulen korrekt angebracht wurden und mit der richtigen Polarisierung an die Spannungsquelle angeschlossen sind. Die angegebene Stromstärke wird nicht gemessen, sondern ist eine empirische Schätzung aus den Messwerten des Magnetfeldes.

Anschliessend lässt sich ablesen, wie viele Messwerte auf welcher Messlänge aufgenommen wurden. Relevant ist dabei vor allem der grösste Abstand zwischen zwei Messwerten. Da über die Anordnung der Sensoren in Querrichtung ein Messwert pro cm aufgenommen wird, ist es für ein gutes Messbild wünschenswert, dass der grösste Abstand zwischen zwei Messwerten in Längsrichtung unter diesem Wert bleibt. Ist das nicht der Fall, so wurde das Messgerät entweder kurzzeitig sehr schnell bewegt (schneller als 0,36 m/s), oder aber die Funkverbindung zwischen PC und Messgerät war unterbrochen.

6.2.2 Bearbeiten

Unter *Bearbeiten* (Abb. 6.7) kann bei Bedarf eine Messreihe gelöscht werden.

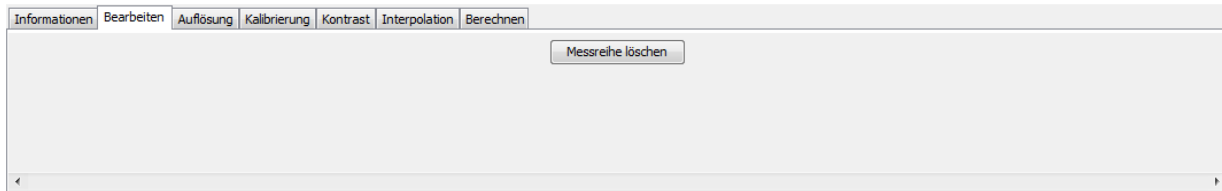


Abb. 6.7 Nachbearbeitung Bearbeiten

6.2.3 Auflösung

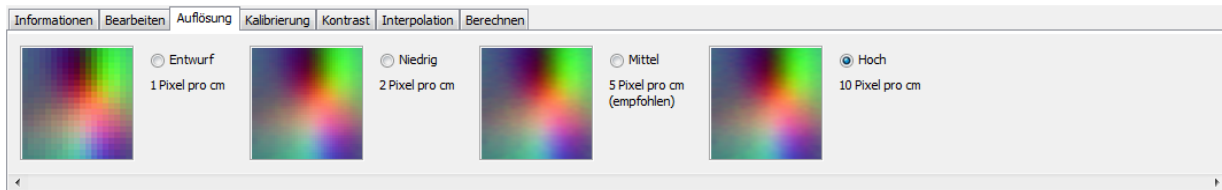


Abb. 6.8 Nachbearbeitung Auflösung

Für das Bild, das aus den Messwerten errechnet wird, kann die gewünschte *Auflösung* (Abb. 6.8) eingestellt werden. Die geringste Einstellung, nämlich 1 Pixel pro cm, entspricht exakt der Messauflösung in Querrichtung, da auf dem Gerät exakt 1 Sensor pro cm angeordnet ist. Da in Längsrichtung bei üblicher Messgeschwindigkeit eine höhere Messauflösung erreicht werden kann, ist es sinnvoll, die Auflösung auf 5 oder 10 Pixel pro cm einzustellen. Die Berechnung dauert dadurch nur geringfügig länger.

Ist das Bildraster größer als das Messraster, so wird für jeden Bildpixel ein gewichtetes Mittel aus den zugrundeliegenden Messwerten gebildet. Wenn das Bildraster feiner ist, als das Messraster, wird interpoliert. Die Regeln für die Interpolation können gesondert eingestellt werden.

6.2.4 Kalibrierung

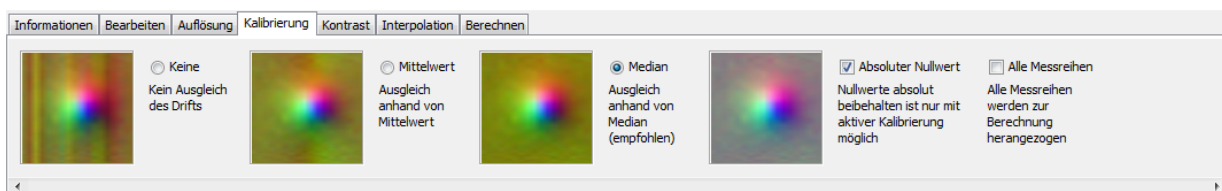


Abb. 6.9 Nachbearbeitung Kalibrierung

Unter *Kalibrierung* (Abb. 6.9) kann ein Abgleich der Signalstärken der einzelnen Sensoren untereinander vorgenommen werden. Ein Abgleich der Signalstärken ist auf Grund des Sensorverhaltens und der Art des Messaufbaus notwendig.

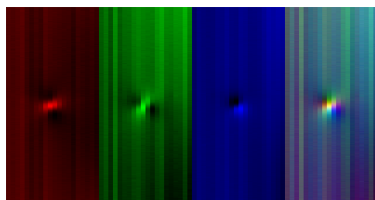
Zunächst hat jeder Sensor aufgrund von Ungenauigkeiten in der Fertigung und unterschiedlicher Alterung einen Drift. Das Messsignal weicht also bei jedem Sensor kontinuierlich und systematisch ab. In Abwesenheit eines Feldes,

bzw. wenn lediglich das vernachlässigbar schwache Erdmagnetfeld vorhanden ist, wenn also alle Sensoren in etwa null ausgeben sollten, zeigt jeder Sensor aufgrund seines Drifts einen Wert massgeblich grösser oder kleiner als null an. Die Software kann diesen Effekt näherungsweise kompensieren. Was nicht näher untersucht wurde und folglich auch nicht kompensiert wird, ist, ob bei allen Sensoren die Signalstärke gleichermassen mit der Feldstärke ansteigt.

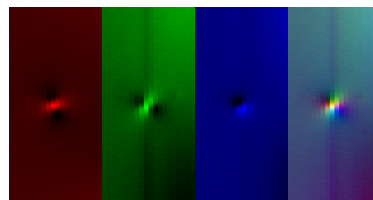
Ausserdem erzeugt die Magnetisierungseinrichtung ein inhomogenes Magnetfeld. Die Feldstärken an den Randsensoren sind eher niedriger als die Feldstärken in der Mitte. Dieser Effekt liesse sich allenfalls für eine leere Messung quantifizieren, für eine reale Messsituation ist keine quantitative Aussage möglich, da es je nach Lage der Stahlstäbe zu Umlagerungen des Feldes kommt. Eine vollständige Kompensation dieses Effektes ist daher nicht möglich. Signale in den Randbereichen der Messung erscheinen unter Umständen etwas schwächer, bleiben aber durch ihre Charakteristik erkennbar.

Aufgrund der genannten Effekte wurde darauf verzichtet, die Sensoren auf Absolutwerte in einem definierten Feld zu kalibrieren. Eine solche Kalibrierung müsste, um ihre Qualität sicherzustellen, nach einiger Zeit überprüft und gegebenenfalls wiederholt werden.

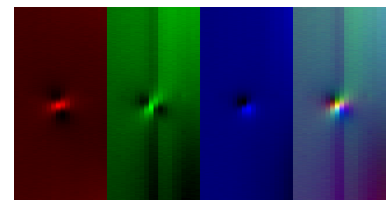
Die Ermittlung des Normalwertes für die Kalibrierung geschieht daher für jede Messreihe aufs neue, indem die Signalstärken der Sensoren untereinander abgeglichen werden. Für diesen Abgleich stellt die Software verschiedene Optionen bereit.



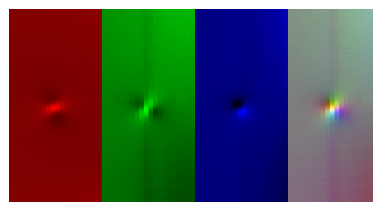
a) Keine Kalibrierung, kein absoluter Nullwert



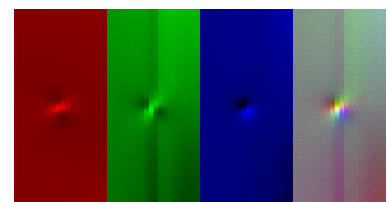
b) Kalibrierung über Mittelwert, kein absoluter Nullwert



c) Kalibrierung über Median, kein absoluter Nullwert



d) Kalibrierung über Mittelwert, absoluter Nullwert



e) Kalibrierung über Median, absoluter Nullwert

Abb. 6.10 Kalibrierungsbeispiele

Die Auswirkungen von einigen möglichen Optionen sind in Abbildung 6.10 veranschaulicht. Dort wird das Signal eines kleinen Wandmagnets mit unterschiedlichen Kalibrierungen dargestellt.

Wird keine Kalibrierung vorgenommen (Abb. 6.10a)), ist der Drift der Sensoren in Form von Längsstreifen in allen Komponenten deutlich sichtbar.

Das Signal des Magnets ist stärker als der Drift und ist daher trotzdem sichtbar.

Eine Kalibrierung kann nun entweder über den Mittelwert (Abb. 6.10b) und Abb. 6.10d)) oder den Median (Abb. 6.10c) und Abb. 6.10e)) vorgenommen werden. Dabei wird für das Signal von jedem Sensor über die gesamte Messlänge der Mittelwert bzw. Median berechnet. Dieser gilt dann als Normalwert, das bedeutet, dass alle Mittelwerte bzw. Mediane die gleiche Farbe zugeordnet bekommen. Die Auswirkung kann in den Abbildungen beobachtet werden: Der Sensordrift wurde wirksam ausgeblendet. Das stark positive Signal, das der gemessene Magnet in der y-Komponente verursacht, setzt jedoch Mittelwert und Median so weit herauf, dass in der Darstellung ein dunkler Längsstreifen entsteht. Ein Bruchsignal verursacht diesen Effekt nicht, da dort die positiven und negativen Signale in allen Komponenten ausgewogen sind.

Wenn kalibriert wird, kann zusätzlich ausgewählt werden, ob es einen absoluten Nullwert geben soll. Wenn in einer Komponente die positiven oder negativen Signale überwiegen, so kommt der Nullwert unterhalb bzw. oberhalb von 50% Intensität zu liegen. Da praktisch in keiner Komponente die Verhältnisse zwischen positiven und negativen Signalen ausgeglichen sind, kommt es in der kombinierten Darstellung der Komponenten zu einem Farbstich (Abb. 6.10b) und Abb. 6.10c)). Setzt man allerdings einen absoluten Nullwert, werden die Normalwerte der Signale auf 50% Intensität festgesetzt. Dadurch geht zwar etwas Kontrast verloren, da die Darstellung nun nicht mehr sämtliche Intensitäten von 0% bis 100% ausnutzt, jedoch vereinfacht sich die Interpretation in der kombinierten Darstellung, da die Normalwerte dort als 50% grau und praktisch ohne Farbstich erscheinen (Abb. 6.10d) und Abb. 6.10e)).

Grundsätzlich ist es möglich, dass durch die Kalibrierung etwa die Stabsignale eines Längsstabes eliminiert werden, da sie über die Messlänge relativ konstant sind. (Bruchsignale sind lokale Signale und werden niemals eliminiert.) Das sollte nach Ansicht des Autors auch in Kauf genommen werden, da die Signalqualität der Längsstäbe ohnehin keine saubere Ortung erlaubt. Für Bewehrungsortung gibt es Methoden und Geräte, die besser geeignet sind. Möchte man dennoch die Stabsignale der Längsbewehrung möglichst sichtbar behalten, geht man folgendermassen vor: Misst man flächig und in mehreren Bahnen, so muss man darauf achten, dass sich die Längsstäbe nicht immer unter den selben Sensoren befinden. Hat man also ein Bewehrungsraster mit 100 mm Raster, so darf man den Messwagen beispielsweise nicht um 200 mm versetzen, sondern man lässt die Bahnen überlappen, indem man den Messwagen jeweils etwa um 175 mm versetzt. Die Stäbe befinden sich damit immer unter anderen Sensoren. Wählt man nun bei der Kalibrierung aus, dass alle Messreihen zur Kalibrierung berücksichtigt werden sollen, können solche kontinuierlichen Signale vom Sensordrift unterschieden werden und werden nicht mehr eliminiert.

6.2.5 Kontrast

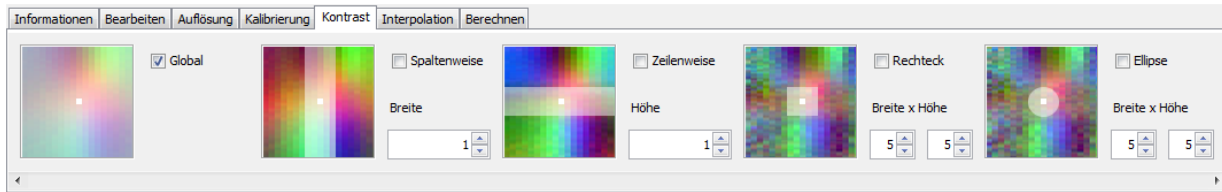
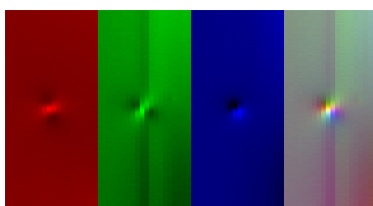


Abb. 6.11 Nachbearbeitung Kontrast

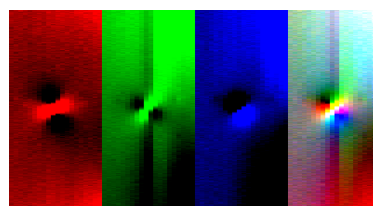
Während bei der Kalibrierung ein Normalwert ermittelt wird, geht es bei den Einstellungen zum *Kontrast* (Abb. 6.11) darum, zu untersuchen, wie weit die Messwerte von diesem Normalwert abweichen und eine Intensitätsspanne festzulegen, um diese Abweichungen möglichst klar darzustellen.

In den meisten Fällen ist es empfehlenswert, die Berechnung des Kontrastes global vorzunehmen. Das ist die Grundeinstellung und benötigt auch kaum Rechenzeit. Global bedeutet, dass innerhalb der gesamten Messreihe der Wert mit der höchsten und der mit der niedrigsten Signalstärke ermittelt wird und dann die höchste bzw. niedrigste Farbintensität zugewiesen bekommt. Dazwischen sind die Intensitäten linear.

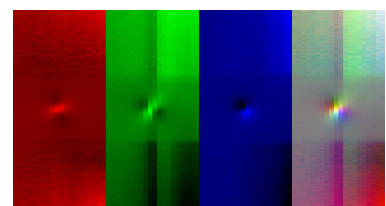
Die globale Einstellung unterdrückt das Rauschen grundsätzlich am effektivsten. Problematisch kann allerdings sein, wenn innerhalb der Messreihe ein Störsignal existiert, welches stärker ausgeprägt ist als ein Bruchsignal. Das dominante Störsignal bestimmt dann die Intensitäten und für die Darstellung des Bruchsignals bleibt nur eine kleine Intensitätsspanne übrig, was die Erkennung erschwert. Gleichermassen kann es auch bei unterschiedlich stark ausgeprägten Bruchsignalen innerhalb einer Messreihe passieren, dass das schwache Signal wegen des stärkeren Signals optisch untergeht.



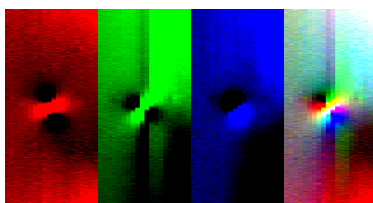
a) Global



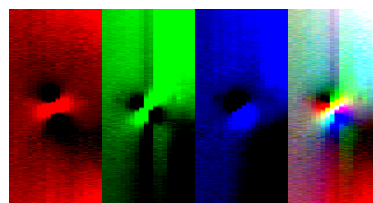
b) Spaltenweise mit 11 cm Breite



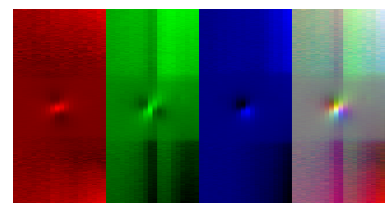
c) Zeilenweise mit 11 cm Höhe



d) Rechteck mit 11x11 cm Breite x Höhe



e) Ellipse mit 11x11 cm Breite x Höhe



f) Kombiniert spaltenweise mit 11 cm Breite und zeilenweise mit 11 cm Höhe

Abb. 6.12 Kontrastbeispiele

Daher stellt die Software Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung,

mit denen der Kontrast in einem definierten lokalen Bereich berechnet werden kann. Beispiele für die unterschiedlichen Einstellungen sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Gemessen wurde ein kleiner Wandmagnet. Alle lokalen Berechnungen haben gemeinsam, dass sie in Bereichen ohne nennenswerte Signalstärken das Rauschen deutlich verstärken. Je nach gewählter Einstellung wurde das Signal des Magnets ebenfalls deutlich verstärkt.

Neben der globalen Kontrastberechnung ist die zeilenweise Festlegung des Bereichs die wichtigste Einstellung. Diese eignet sich besonders, falls die Störsignale der Querbewehrung die Bruchsignale überdecken könnten. Sind allerdings Störsignal und Bruchsignal räumlich zu nahe beieinander, kann auch dieses Werkzeug keine Verbesserung bewirken.

6.2.6 Interpolation

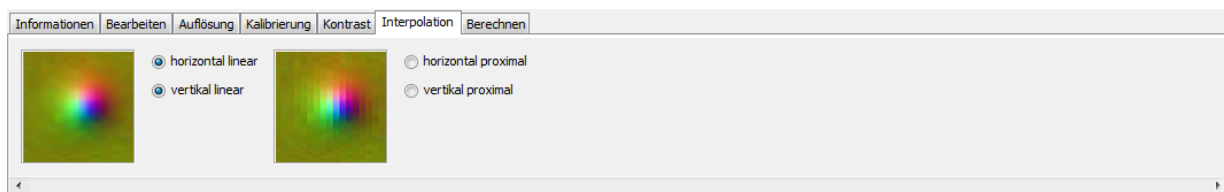


Abb. 6.13 Nachbearbeitung Interpolation

Unter *Interpolation* (Abb. 6.13) kann gesondert für die horizontale und vertikale Richtung zwischen einer linearen und einer proximalen Näherung gewählt werden.

Eine digitale Messung geschieht nie kontinuierlich, sondern deckt immer nur diskrete Punkte ab. So zeichnet auch dieser Messwagen nur einzelne Punkte auf einer Fläche auf. In der Horizontalen ist der Abstand dieser Punkte durch den Abstand der Sensoren bestimmt, die jeweils 1 cm auseinander liegen. In der Vertikalen hängt der Abstand der Messpunkte von der Messgeschwindigkeit ab.

Die Signalstärken zwischen den gemessenen Punkten sind grundsätzlich nicht bekannt. Für eine flächige Darstellung der Messwerte müssen daher mittels Interpolation Zwischenwerte berechnet werden. Als gängige Interpolationsverfahren wurde die lineare und die proximale Interpolation implementiert.

Beispiele sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Die lineare Interpolation wirkt glättend, auch wenn der Länge nach nur eine unzureichende Zahl an Messwerten zur Verfügung steht. Es besteht dabei die Gefahr, dass eine Genauigkeit vorgetäuscht wird, die nicht vorhanden ist. Inwieweit ein schlechtes Messbild auf zu schwache Signale oder zu wenige Messpunkte zurückzuführen ist, lässt sich aus einem linear interpolierten Bild schlecht abschätzen.

Die proximale Interpolation erlaubt eine bessere Beurteilung der Messqua-

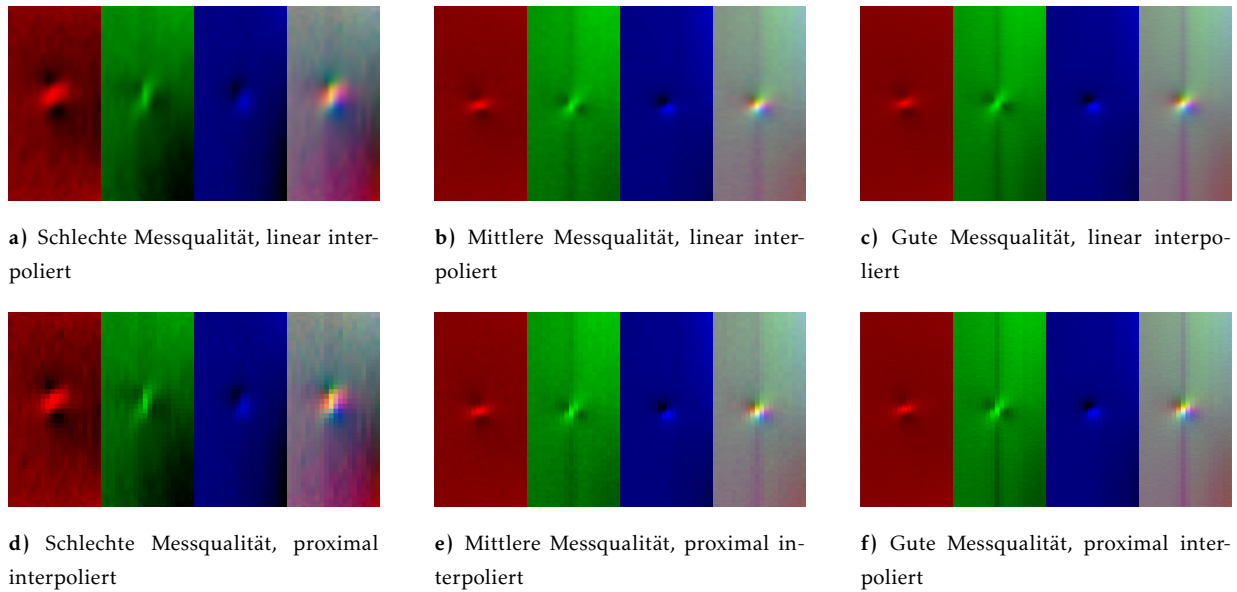


Abb. 6.14 Interpolationsbeispiele

lität. Hierbei wird jedem Bildpunkt die Signalstärke desjenigen Messpunktes zugeteilt, der die kleinste Entfernung hat. Dieses Verfahren wird daher auch als nearest neighbour interpolation bezeichnet. Im Gegensatz zu den kontinuierlichen Farbverläufen der linearen Interpolation entstehen hierbei Rechtecke von konstanter Farbintensität. Über die Höhe dieser Rechtecke kann visuell beurteilt werden, ob die Messauflösung der Länge nach ausreichend ist.

Durch zu schnelle Bewegung des Messwagens entsteht schlechte Messqualität, nicht nur, weil somit weniger Messpunkte zur Verfügung stehen, sondern auch, weil das Rauschen der Sensoren ein zeitliches Phänomen ist, was sich bei längerer Messdauer besser herausmitteln lässt.

6.2.7 Berechnen

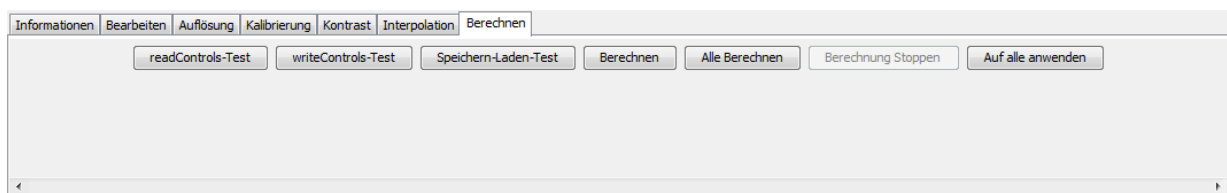


Abb. 6.15 Nachbearbeitung Berechnen

Schlussendlich kann unter *Berechnen* (Abb. 6.15) das Messbild mit den gewählten Einstellungen erstellt werden.

Es kann dabei die Berechnung der ausgewählten Messreihe oder gerade von allen Messreihen gleichzeitig gestartet werden. Die Berechnung von mehreren Messreihen wird auf Mehrkernsystemen parallel ausgeführt. Die Einstellungen der ausgewählten Messreihe können auch auf alle anderen Messreihen übertragen werden.

6.3 Positionierung

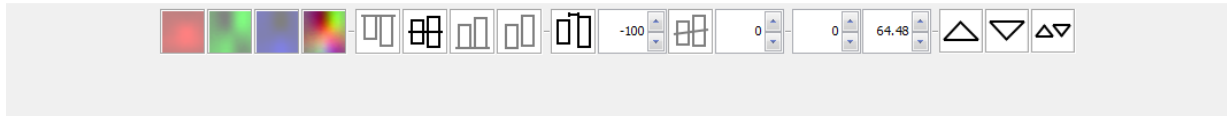


Abb. 6.16 Werkzeuge für die Positionierung

Als dritter und letzter Schritt werden die Messreihen in der *Positionierung* zu einem Messbild zusammengefasst. Für die Anordnung und Darstellung stehen mehrere Werkzeuge (Abb. 6.16) zur Verfügung.

6.3.1 Farbkanal

Die drei Komponenten der Messung können separat oder in der kombinierten Darstellung angezeigt werden. Dazu kann der entsprechende Farbkanal (Abb. 6.17) ausgewählt werden. In diesem Beispiel ist die kombinierte Darstellung ausgewählt.

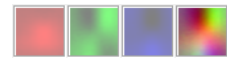


Abb. 6.17 Farbkanal

6.3.2 Vertikale Ausrichtung

Die Messreihen können in der Vertikalen automatisch ausgerichtet (Abb. 6.18) werden. Die Ausrichtung kann entweder oben bündig, zentriert, unten bündig oder frei erfolgen. In diesem Beispiel ist die zentrierte Ausrichtung gewählt.

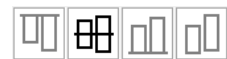


Abb. 6.18 Vertikale Ausrichtung

6.3.3 Horizontale Ausrichtung

Für die horizontale Ausrichtung (Abb. 6.19) sind zwei Funktionen verfügbar, die einzeln oder auf kombiniert aktiviert werden können: Zunächst kann ein konstanter horizontaler Abstand zwischen den benachbarten Messreihen gewählt werden. Dieser ist in diesem Beispiel als negativer Wert von 100 mm festgelegt, stellt also eine Überlappung der Messwerte dar. Dann können die Messreihen zusätzlich noch in einer konstanten Steigung angeordnet werden, sofern die vertikale Ausrichtung ebenfalls aktiviert ist und nicht frei belassen wurde. Diese Funktion ist in diesem Beispiel deaktiviert und ist auch nur in wenigen Fällen wie etwa bei einer schiefen Bewehrung sinnvoll.

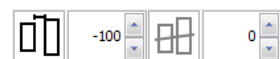


Abb. 6.19 Horizontale Ausrichtung

6.3.4 Koordinaten

Die Koordinaten (Abb. 6.20) der einzelnen Messreihe können in vertikaler und horizontaler Richtung auch manuell verändert werden. Macht man von der manuellen Einstellung Gebrauch, wird die vertikale bzw. horizontale Ausrichtung auf frei gesetzt.



Abb. 6.20 Koordinaten

6.3.5 Reihenfolge



Abb. 6.21 Reihenfolge

Die Messreihen werden in der Reihenfolge, in der sie in der Seitenleiste aufgeführt sind, von links nach rechts positioniert. Die Reihenfolge (Abb. 6.21) kann verändert werden, indem die markierte Messreihe nach oben oder unten verschoben wird. Ebenfalls kann die Reihenfolge sämtlicher Messreihen umgekehrt werden.

6.3.6 Resultat

Das Resultat der Positionierung mit den gewählten Einstellungen ist im Überblick von Abbildung 6.1 zu sehen.

7 Ermüdungsversuche

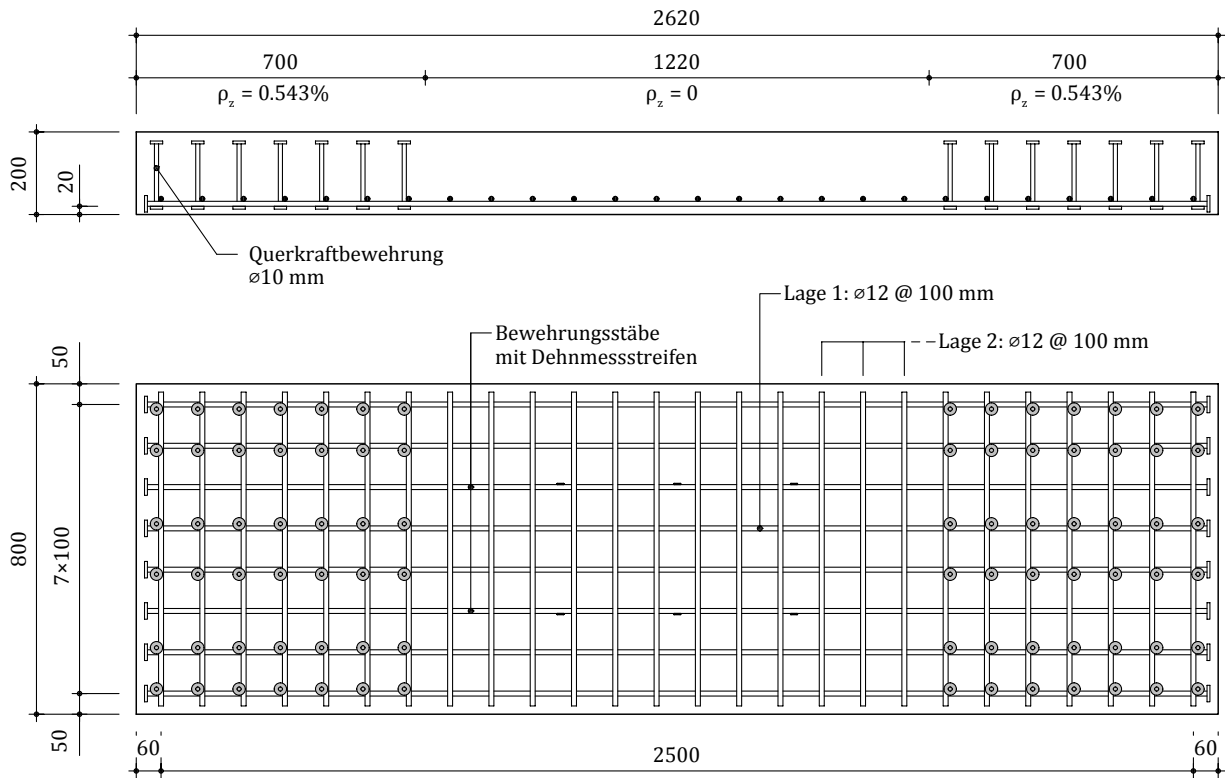
Wie in Kap. 1.1 dargelegt, war ein Forschungsprojekt zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken von [FEHLMANN 2012] der Auslöser, die magnetische Streufeldmethode an der ETH Zürich zu nutzen und durch [WOLF 2012] weiterzuentwickeln. Beim Folgeprojekt von Christian Spathelf kommt für die Versuche zum Ermüdungsverhalten von Plattenstreifen ebenfalls die magnetische Streufeldmethode unterstützend zu den gängigen Prüfmethoden zum Einsatz. In dieser Dissertation werden nur die Ergebnisse der Streufeldmessung veröffentlicht und kommentiert. Für die weiteren Forschungsergebnisse erscheint in nächster Zeit die Dissertation [SPATHELF 2016].

7.1 Forschungsziele Ermüdung

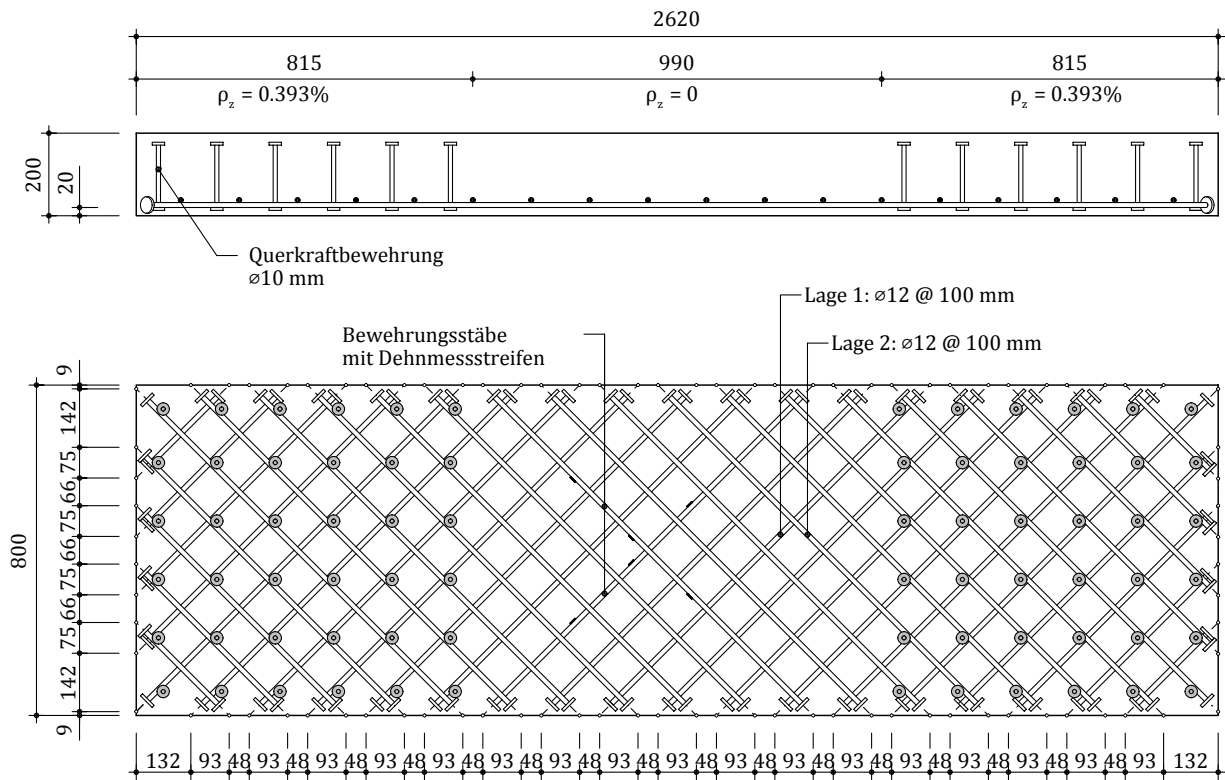
Der Zustand der Brücken in der Schweiz ist bezüglich Ermüdung weitgehend unbekannt. Vorhandene Rechenmodelle zu bewehrtem Beton erlauben keine Abschätzung des aktuellen Zustandes und auch keine zuverlässige Prognose zur verbleibenden Lebensdauer. Die Modelle für Balken sind laut [FEHLMANN 2012] – innerhalb ihrer statistischen Grenzen – aussagekräftig, genügen aber nicht der statisch unbestimmten Natur einer Platte, bei der ein genauer Lastpfad nicht a priori bestimmbar ist und sich im Verlauf der Belastungsgeschichte mit der Rissbildung noch weiter verändert. Ebenfalls wurde bisher dem progressiven Versagen nach dem ersten Stabbruch nicht genügend Rechnung getragen, da sich die Spannungen nach dem Versagen einzelner Stäbe umlagern und somit die Beanspruchung für die restlichen Stäbe ansteigt. ([SPATHELF 2016])

Die Forschung von Christian Spathelf richtet sich schwerpunktmässig auf das Biegeverhalten von orthogonal bewehrten Betonplatten unter zyklischer Belastung. Dazu wurden insgesamt vier Platten (Abb. 7.1) im Vier-Punkt-Biegeversuch (Abb. 7.2) beansprucht. Die Platten sind orthogonal und isotrop in beide Richtungen mit Bewehrungsstäben von 12 mm Durchmesser alle 100 mm bewehrt. Die Mindestüberdeckung beträgt 20 mm. Alle Stäbe, die durch die Plattenbiegung beansprucht werden, haben an ihren Enden aufgestauchte Anker, um einen optimalen Verbund ohne Endhaken zu garantieren. Querkraftbewehrung wurde nur an den Plattenenden eingelegt, wo auch tatsächlich eine Querkraft auftritt. ([SPATHELF 2016])

Dabei ist bei zwei Platten jeweils nur die erste Bewehrungslage der



a) Serie A, Ansicht von der Seite und von oben



b) Serie B, Ansicht von der Seite und von oben

Abb. 7.1 Abmessungen und Ansichten der Platten, aus [SPATHELF 2016]

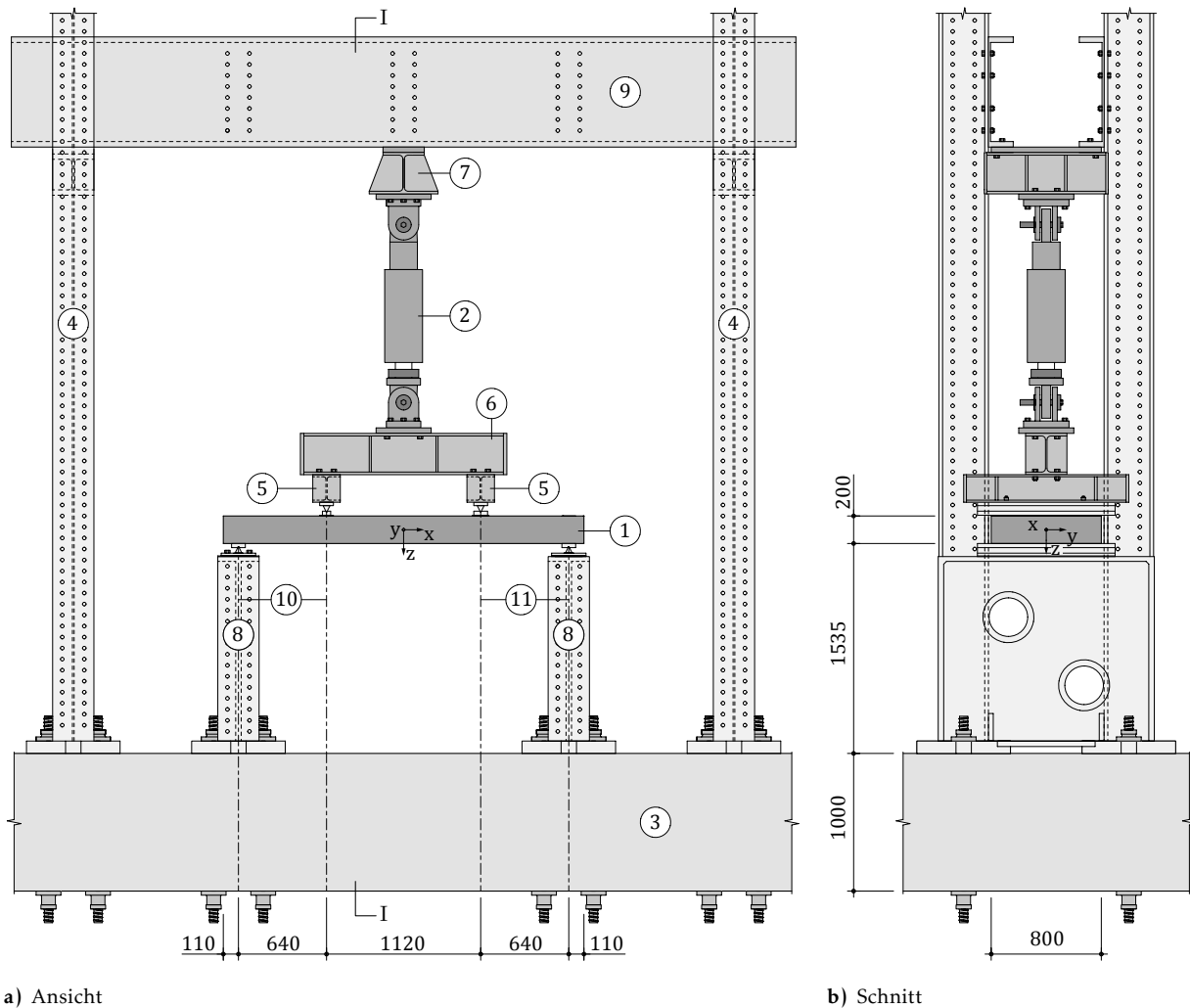


Abb. 7.2 Versuchsaufbau, aus [SPATHELF 2016]

Biegebeanspruchung ausgesetzt (Serie A). Bei den anderen zwei Platten ist die Bewehrung um 45° zur Momentenrichtung gedreht, sodass beide Lagen der Biegung ausgesetzt sind (Serie B). Durch den Vergleich im Ermüdungsverhalten beider Bewehrungslayouts können die Auswirkungen bei Abweichungen von der Hauptmomentenrichtung näher erforscht werden und letztlich Aussagen zur Ermüdung in einem allgemeinen Momentenzustand getroffen werden. Von besonderer Relevanz sind daher die Beobachtungen zwischen dem Versagen des ersten Stabes und dem Versagen des gesamten Prüfkörpers. ([SPATHELF 2016])

Die Belastung geschieht zyklisch über einen hydraulischen Zylinder, der die Kraft auf ein Pendeljoch aufbringt. Dieses Pendeljoch verteilt die Kraft in Form von zwei Linienlasten über die gesamte Breite der Platte. Der Zylinder wechselt zyklisch zwischen einer Oberlast von insgesamt 131 kN und einer Unterlast von 25 kN. Die Unterlast stellt dabei den Lastfall von Eigen- und Auflast dar, die Oberlast enthält zusätzlich die Verkehrslast. Mit der Oberlast ergibt sich in der Platte ein Moment, das etwa 60% des Fliessmomentes beträgt. ([SPATHELF 2016])

Gemessen wird mit mehreren Verfahren, wobei einige Messungen während

- ① Prüfkörper
- ② Servohydraulischer Aktuator
- ③ Aufspannboden
- ④ HEB 360 Stütze
- ⑤ HEB 200 Lastverteiler
- ⑥ HEB 300 Lastverteiler
- ⑦ Querbalken
- ⑧ Schubwandelement
- ⑨ Riegel
- ⑩ Kipplager, fest
- ⑪ Kipplager, gleitend

c) Legende

der Belastung erfolgen und andere nur in den Belastungspausen stattfinden können. Während der Belastung werden quasi-kontinuierlich die Werte der Wegmesser ausgelesen und gespeichert, die die Gesamtdurchbiegung und die Dehnung oben erfassen. Ebenfalls sind über Dehnmessstreifen punktuell Aussagen über die Stahlspannungen auf zwei Stäben pro Platte möglich. Es findet eine Kalibration über Temperaturmessungen statt. Im nicht beanspruchten Bereich befinden sich zusätzliche Dehnmessstreifen auf einbetonierten Bewehrungsstäben. In den Belastungspausen werden die Dehnungen bei Ober- und Unterlast flächig per Deformeter gemessen. Dazu ist auf der gesamten zugänglichen Oberfläche ein Netz aus Aluminium-Messbolzen aufgebracht. Betonrisse sind durch den weissen Anstrich sichtbar und werden mit dem Risslineal vermessen und mit schwarzem Filzstift nachgezeichnet. Das Rissbild wird fotografisch festgehalten. ([SPATHELF 2016])

7.2 Forschungsziele magnetische Streufeldmethode

Die Messungen am Holzrahmen mit präparierten Bewehrungsstäben, wie sie in Abbildung 4.16a) (S. 50) dargestellt sind, liefern eine erste Einschätzung zur Tauglichkeit von Messgerät und Methode. Dabei bleiben allerdings einige Fragen offen.

7.2.1 Eigenschaften der Brüche

Die Brüche in den Bewehrungsstäben am Holzrahmen sind keine Brüche im eigentlichen Sinne, denn sie sind weder durch Ermüdung noch durch Verformung entstanden, sondern maschinell gesägt. Die Form und Ausbildung der „Bruchflächen“ ist daher künstlich. Auch ist die Messung eines Bruches ohne Spalt kaum möglich, da die gesägten Flächen nie präzise aufeinander passen. Da ein Spalt das Bruchsignal verstärkt, liegt die Vermutung nahe, dass die Experimente am Holzrahmen eine Signalqualität vortäuschen, wie sie in der Realität nicht erreicht wird.

Von der Messung am Versuchskörper wird dagegen ein realistischeres Bild erwartet. Hier können Brüche mit extrem kleinem Spalt untersucht werden. Dies nicht nur, weil die Bruchflächen präzise aufeinander passen, sondern auch, weil ein Bruch bei Entspannung der Platte durch die intakten Nachbarstäbe zusammengehalten wird. Die Versuche müssen daher klären, ob dieser Effekt kritisch ist, oder ob dennoch brauchbare Resultate möglich sind.

7.2.2 Bewehrungslayout und Bruchbild

Die Konzipierung des Versuchs als Vier-Punkt-Biegeversuch ist darin begründet, dass es bei [SPATHELF 2016] in erster Linie um die Entwicklung und Verifizierung eines Rechenmodells zur Ermüdung ging. Dabei war es zielführend, einen grösseren Bereich mit näherungsweise konstantem Moment zu erzeugen, was eine näherungsweise konstante Ermüdungsbeanspruchung

bedeutet. Die Querkraft ist in diesem Bereich praktisch eliminiert. Es war nicht das primäre Ziel ein möglichst realistisches Bruchbild zu produzieren, wie es tatsächlich an Fahrbahnplatten auftreten könnte. Dazu gibt es Forschungsarbeiten wie z.B. [SONODA/HORIKAWA 1982] und [PERDIKARIS/BEIM 1988], die mit bewegten Lasten arbeiten.

Letztlich lagen die Entscheidungen über das Layout der Platten sowie die Art der Belastung vollständig ausserhalb des Einflussbereichs des Autors. Das ist ein entscheidender Vorteil, da sich dadurch Herausforderungen in Form von Störquellen und unerwarteten Bruchbildern ergeben haben, die der Autor sicher nicht auf diese Art im Holzrahmen nachgebildet hätte.

7.3 Messergebnisse und Interpretation

7.3.1 Störsignale in den Experimenten

Experimentell konnten neben den Bruchsignalen auch einige Störsignale beobachtet und identifiziert werden.

Ein markantes Signal geht von den Ankerköpfen (Abb. 7.3) aus. Dieses kann zwar stärker als ein Bruchsignal hervorstechen, ist aber örtlich klar begrenzt. In diesem Versuchsaufbau ist die Momentenbeanspruchung im Bereich der Anker geringer als in Feldmitte. Im Bereich der Lasteinleitung kam es allerdings zu einem Bruch (Nr. 311) in unmittelbarer Nähe eines Ankerkopfes. Dieser Bruch konnte trotz Störsignal problemlos detektiert werden. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass massive Elemente aus Stahl ein Bruchsignal überdecken können.

Ein weiteres Störsignal stellten die Distanzhalter (Abb. 7.4) dar. Diese enthalten einen ferromagnetischen Draht, mit dem die Bewehrung befestigt werden kann. Die resultierenden Signale sind spitz und nehmen nur wenig Raum ein.

Für beide Störsignale wurde eine Identifizierung mittels Template Matching versucht, mit der Absicht diese Signale zu finden und gezielt herauszurechnen. Dieser Versuch ist gescheitert, da für keines der beiden Signalquellen ein repräsentatives Referenzsignal gefunden werden konnte. Im Gegensatz zu einem Bruchsignal sind diese Störsignale sehr inkonsistent in ihrem Erscheinungsbild.

In keinem Fall konnte zwischen einem Störsignal und einem Bruchsignal eine Ähnlichkeit festgestellt werden. Mit der nötigen Erfahrung besteht letztlich keine Verwechslungsgefahr. Für den ungeübten Betrachter können solche Signale deutliche Unsicherheiten bedeuten, vor allem, wenn es die einzigen Signale sind, die an einem eigentlich intakten Bauteil auftreten.



Abb. 7.3 Ankerkopf



Abb. 7.4 Distanzhalter

7.3.2 Unterschied zwischen Ober- und Unterlastmessung

Ein sehr wichtiger Parameter für die Signalstärke ist die Spaltbreite eines Bruches. Dieser Zusammenhang tritt bei dem Vergleich zwischen der Ober- und Unterlastmessung deutlich in Erscheinung.

Bei einer Messung bei Oberlast, also mit Verkehrslasten, ergeben sich sehr deutliche Bruchsignale, da die Bewehrungsstäbe unter Zug geraten und die Brüche sich ein Stück öffnen. Dieser Fall ist unrealistisch, es sei denn, man würde ein Belastungsfahrzeug über der Messstelle positionieren, was ein unverhältnismässiger Aufwand wäre.

Die Bruchsignale bei Unterlast sind etwas schwächer und geben eher ein realistisches Bild von dem ab, was man in der Praxis von der Methode erwarten kann. Um wie viel die Signale schwächer sind als bei der Oberlast, hängt davon ab, inwieweit die Verformung noch reversibel ist. Hat ein gebrochener Stab noch intakte Nachbarstäbe, so schliesst sich der Riss eher beim Reduzieren der Last. An Querschnitten mit mehreren gebrochenen Stäben blieben die Risse im Versuch auch bei Unterlast weit offen, wodurch hier grundsätzlich starke Bruchsignale gemessen werden konnten. In solchen Fällen hätte allerdings auch eine rein visuelle Kontrolle den alarmierenden Zustand festgestellt.

In den Messbildern (Abb. 7.5 bis 7.16) ist die letzte Ober- bzw. Unterlastmessung abgebildet, die am jeweiligen Versuchskörper durchgeführt wurde. Bis zum Erreichen des Bruchkriteriums können noch weitere Stahlbrüche entstehen, die zwar auf den Fotos (Abb. 7.17 bis 7.20) zu sehen sind, aber nicht im Messbild auftauchen.

Bruch	Messbild		Algorithmus	
	O	U	O	U
101	+	+	+	-
102	+	+	+	+
103	+	+	+	+
104	+	+	-	-
105	+	+	+	+
106	+	+	+	+
107	+	+	-	-
108	+	+	+	-
109	+	+	+	+
110	+	+	+	-
111	+	+	-	-
FP	0	0	1	2

Tab. 7.1 A1: Detektierbarkeit der Brüche

7.3.3 Bruchkriterium und Detektierbarkeit

Für alle Platten wurde die Detektierbarkeit der Brüche tabellarisch (Tab. 7.1 bis 7.4) erfasst. Zudem wurden die falsch-positiven Signale (FP) aufgeführt. Die Diagnose kann dabei sowohl durch gründliche Betrachtung des Messbildes, als auch über den entwickelten Algorithmus mit Korrelation und Schwellenwert durchgeführt werden.

Die Betrachtung des Messbildes wird separat für alle drei Komponenten und in der kombinierten Darstellung durchgeführt. Dabei wird nach Signalen mit typischem Bruchcharakter Ausschau gehalten. Im Zweifelsfall wird versucht, durch veränderte Einstellungen in der Software Klarheit über mögliche Schadstellen zu erlangen. Für den Leser der Druckversion muss dabei angemerkt werden, dass die Bildschirmdarstellung für die Beurteilung wesentlich vorteilhafter ist. Die Betrachtung des Messbildes durch den Autor stellt selbstverständlich ein sehr subjektives Kriterium dar.

Objektiver, nicht unbedingt besser, aber eine sinnvolle Ergänzung ist die Beurteilung über den entwickelten Algorithmus. Hierbei ist eine weisse Fläche - egal welcher Grösse - als Bruchsignal definiert. Auf die Stärken und Schwächen wird weiter in den Betrachtungen der Versuchsergebnisse eingegangen.

Beide Kriterien werden auf die Ober- und Unterlastmessung angewandt.

7.3.4 Ergebnisse Versuchskörper A1 (Abb. 7.5, 7.6 und 7.17)

Die Definition des Bruchkriteriums für die Platte ist, dass bei zunehmender Durchbiegung die Last nicht mehr gesteigert werden kann, sodass die Oberlast nicht mehr erreicht wird. Die Besonderheit bei A1 war, dass dieses Bruchkriterium auf eine duktile Weise erreicht wurde. Daher konnte noch nach Erreichen des Bruchkriteriums eine Messung durchgeführt werden, mit einer Belastung, die annähernd der Oberlast entspricht. Dies war bei 1'140'040 Lastzyklen.

Am Schluss der Belastung konzentrierten sich fünf Brüche (103, 104, 105, 107 und 109) auf einen Querschnitt, was zum Versagen führte. Die anderen Brüche sind weiter verteilt. Für den Autor unerwartet war die Nähe der Brüche 110 und 111. Diese befinden sich im gleichen Bewehrungsstab in einem Abstand von nur etwa 20 cm. Offensichtlich konnte sich im Stahl nach dem ersten Bruch trotz einer sehr kurzen Verankerungslänge wieder genügend Spannung für einen weiteren Bruch aufbauen.

Alle Brüche konnten im Messbild identifiziert werden. Bei Bruch 104 war die Identifizierung am anspruchsvollsten. Wie sich nach dem Abtragen der Überdeckung zeigte, war dieser Bruch nur teilweise durchtrennt und wies einen Restquerschnitt mit einer leichten Einschnürung auf.

Mit dem Algorithmus konnten bei Oberlast 8 von 11 und bei Unterlast noch 5 von 11 Brüchen identifiziert werden. Für diesen Unterschied ist die geringere Bruchdehnung bei Unterlast verantwortlich. Die Signalstärke ist also ein entscheidendes Kriterium für die Zuverlässigkeit des Algorithmus.

Eine weitere Schwierigkeit sind nahe beieinanderliegende Brüche. So wurde beispielsweise der im Messbild sehr auffällige Bruch 107 vom Algorithmus nicht detektiert, dafür aber der sehr schwache Bruch 106 problemlos identifiziert. Auf diesen Effekt wird später noch näher eingegangen.

In den Randbereichen finden sich bei Oberlast ein falsch positives Signal und bei Unterlast zwei. Der Algorithmus ist in den Randbereichen grundsätzlich anfälliger für zufällige Korrelationen, da hier kleinere Bilder miteinander verglichen werden.

7.3.5 Ergebnisse Versuchskörper A2 (Abb. 7.7, 7.8 und 7.18)

Die letzte Messung an Platte A2 fand bei 825'514 Zyklen statt. Das Bruchkriterium wurde nach 270 weiteren Zyklen, also insgesamt bei 825'784 erreicht.

Wie bei A1 konzentrierten sich am Schluss fünf Brüche (204, 209, 212, 214, 218) auf einen Querschnitt, in dem sich dann auch ein Gelenk ausbildete. Die Besonderheit war, dass ein Stab insgesamt achtmal gebrochen war (201 bis 208), teilweise im Abstand von nur etwa 10 cm.

Im Messbild konnten bei Oberlast 17 der insgesamt 18 Brüche zweifelsfrei

Bruch	Messbild		Algorithmus	
	O	U	O	U
201	+	+	-	-
202	+	-	-	-
203	+	-	-	-
204	+	+	+	+
205	+	+	-	-
206	+	+	-	-
207	+	+	-	-
208	+	+	-	-
209	+	+	+	+
210	+	+	+	+
211	+	+	+	+
212	+	+	+	+
213	+	+	+	+
214	+	+	+	+
215	+	+	-	-
216	+	+	+	+
217	+	+	+	+
218	-	-	-	-
FP	0	0	0	1

Tab. 7.2 A2: Detektierbarkeit der Brüche

Bruch	Messbild		Algorithmus	
	O	U	O	U
301	+	+	+	+
302	-	-	-	-
303	+	+	+	+
304	+	+	-	-
305	-	-	-	-
306	+	+	+	+
307	+	+	-	-
308	+	+	-	-
309	+	+	+	+
310	+	+	+	+
311	+	+	+	+
312	-	-	-	-
313	-	-	+	+
FP	0	0	0	0

Tab. 7.3 B1: Detektierbarkeit der Brüche

identifiziert werden. Die acht Brüche (201 bis 208) liessen sich in der roten Komponente zuverlässig abzählen. Bei der Unterlast wären zwei Brüche in diesem Stab übersehen worden, insgesamt aber immerhin noch 15 der 18 Brüche detektiert worden. Bruch 218 ist im Messbild nicht sichtbar. Dieser ist möglicherweise erst in den weiteren Zyklen bis zum Versagen entstanden. Es ist allerdings auch nicht ausgeschlossen, dass zum Zeitpunkt der Messung schon eine Schädigung existierte.

Mit dem Algorithmus konnten sowohl bei Oberlast als auch bei Unterlast 9 von 18 Brüchen detektiert werden. Eine besondere Herausforderung war der Stab mit den insgesamt acht Brüchen, da sich hier die Bruchsignale sehr stark überlagerten. Hier konnte durch den Algorithmus nur der stärkste Bruch identifiziert werden.

Ein falsch positives Signal gab der Algorithmus lediglich bei Unterlast im Randbereich aus.

7.3.6 Ergebnisse Versuchskörper B1 (Abb. 7.9 bis 7.12 und 7.19)

Die letzte Messung an der Platte B1 fand bei 271'345 Zyklen statt. Das Bruchkriterium wurde nach 178 weiteren Zyklen, also insgesamt bei 271'524 erreicht.

Im Gegensatz zu den A-Versuchskörpern sind bei den B-Versuchskörpern beide Bewehrungslagen beansprucht. Ob sich bei einer Schadstelle ein Streufeld ausbildet, ist auch von der Magnetisierungsrichtung abhängig. Sind wie hier beide Bewehrungslagen ermüdungsgefährdet, muss auch in beiden Richtungen gemessen werden. Daher werden für die B-Versuchskörper doppelt so viele Messbilder gezeigt, wie für die A-Versuchskörper.

Dass bei B1 die Momentenrichtung von der Bewehrungsrichtung abweicht, zeigt sich auch deutlich bei der Versagensart der Platte. Im Gegensatz zu den A-Versuchskörpern kann hier nämlich kein eindeutiger und gerader Querschnitt ausgemacht werden, an dem sich ein Gelenk ausgebildet hätte. Vielmehr gibt es zwei grosse und versetzte Betonbrüche, die vom Rand der Platte ausgehen und jeweils ein kurzes Stück nach der Mitte enden.

Die Brüche, die letztlich zum Versagen führten sind sehr wahrscheinlich 302, 303, 304 und 306, möglicherweise zusätzlich auch 301. Lediglich zwei der insgesamt 13 Brüche befanden sich in der zweiten Bewehrungslage.

Über das Messbild konnten bei Oberlast und Unterlast 9 der insgesamt 13 Brüche identifiziert werden. Bei Bruch 302 kann davon ausgegangen werden, dass dieser zum Zeitpunkt der Messung noch nicht bestand. Dieser Bruch zeigt sehr deutlich die Charakteristik eines Verformungsbruches, was auf eine rasche Entwicklung nach der Messung hindeutet. Bruch 305 weist nur einen sehr kleinen Anriss auf und erzeugte daher kein messbares Bruchsignal. Die Brüche 312 und 313, die sich in der zweiten Bewehrungslage befanden, konnten beide nicht im Messbild identifiziert werden. Zwar fand sich bei 313 eine unauffällige Anomalie, die der Autor aber auch bei sehr gründlicher Betrachtung nicht

einem Bruch zugeordnet hätte.

Der Algorithmus entdeckte bei Oberlast und Unterlast jeweils 7 der insgesamt 13 Brüche. Interessanterweise gab der Algorithmus in der zweiten Bewehrungslage bei Bruch 313 ein eindeutiges Signal aus, obwohl die Betrachtung des Messbildes ergebnislos war. Bruch 313 ist tatsächlich auch beim Freilegen der Bewehrung unentdeckt geblieben, da sich der Bruch exakt unter einem Stab der obersten Lage befand. Erst als im Rahmen dieser Auswertungen der Algorithmus auf die Messbilder angewandt wurde, wurde Bruch 313 auf der Platte identifiziert, die längst für die Entsorgung bereitstand.

Falsch positive Signale wurden nicht ausgegeben.

7.3.7 Ergebnisse Versuchskörper B2 (Abb. 7.13 bis 7.16 und 7.20)

Die letzte Messung an der Platte B2 fand bei 219'728 Zyklen statt. Das Bruchkriterium wurde nach nur 13 weiteren Zyklen, also insgesamt bei 219'741 erreicht.

Im Gegensatz zu B1 kann bei B2 ein einziger gerader Betonbruch festgestellt werden. Von den insgesamt acht Brüchen befinden sich sechs in unmittelbarer Nähe zum Bruchquerschnitt, nämlich 401 bis 403, sowie 405 bis 407. Von allen Brüchen befinden sich jeweils die Hälfte in der oberen und die andere Hälfte in der unteren Lage.

Lediglich 2 der insgesamt 8 Brüche konnten im Messbild und mittels Algorithmus festgestellt werden, nämlich 401 und 403.

Die Gründe dafür sind unterschiedlich: Die Brüche 404 und 405 liegen am Rand bzw. ausserhalb des Messbereichs. Vermutlich wäre 405 auch innerhalb des Messbereichs nicht detektiert worden, da sich der Bruch unmittelbar am Ankerkopf befindet. 402 weist lediglich einen sehr dünnen Anriss auf, dessen Streufeld anscheinend nicht deutlich genug war. Bei 406 und 407 kommen zwei Schwierigkeiten zusammen, die wahrscheinlich zum falsch-negativen Signal führten: Beide bilden einen Doppelbruch unmittelbar hintereinander und liegen in der zweiten Bewehrungslage. Bei 408 handelt es sich um einen Bruch mit zumindest teilweisem Verformungscharakter. Dieser war möglicherweise bei der Messung noch nicht so stark ausgeprägt, wie bei der Trägeröffnung.

Falsch-Positive Signale wurden keine ausgegeben.

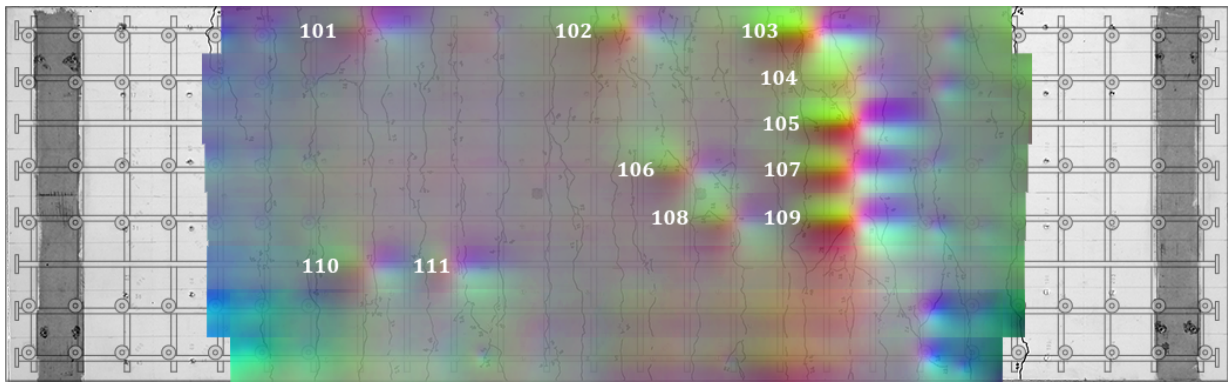
7.3.8 Erkenntnisse und Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine gründliche Betrachtung des Messbildes zu besseren Resultaten führt, als eine reine Anwendung des Algorithmus.

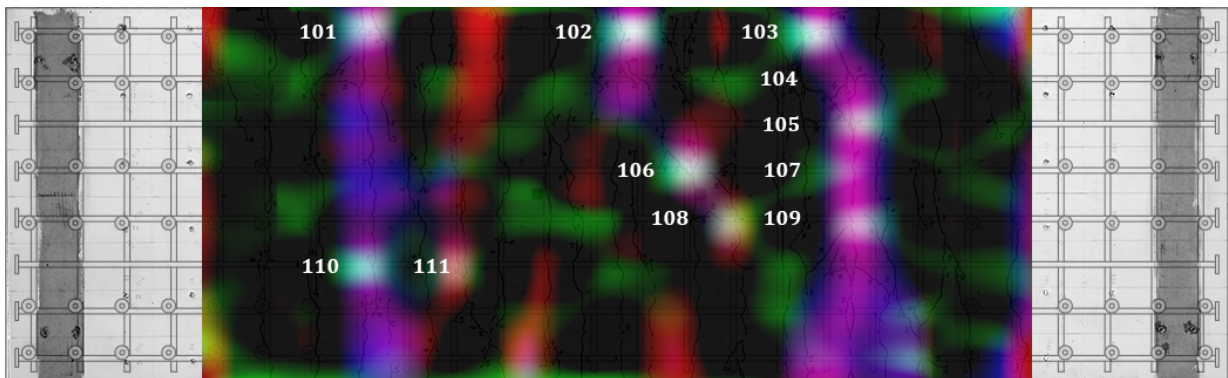
So konnte eine grosse Mehrheit der Brüche erfolgreich über das Messbild identifiziert werden. Falsch negative, also nicht gefundene Brüche, konnten oft darauf zurückgeführt werden, dass der Schaden zu klein oder durch ein Störsignal überlagert war. Falsch positive Signale kamen hier nicht vor.

Bruch	Messbild		Algorithmus	
	O	U	O	U
401	+	+	+	+
402	-	-	-	-
403	+	+	+	+
404				
405				
406	-	-	-	-
407	-	-	-	-
408	-	-	-	-
FP	0	0	0	0

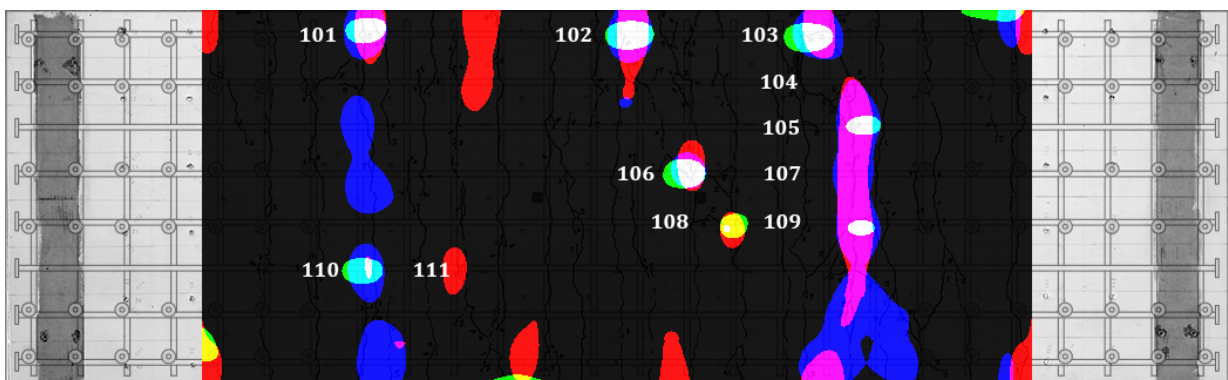
Tab. 7.4 B2: Detektierbarkeit der Brüche



a) Messbild

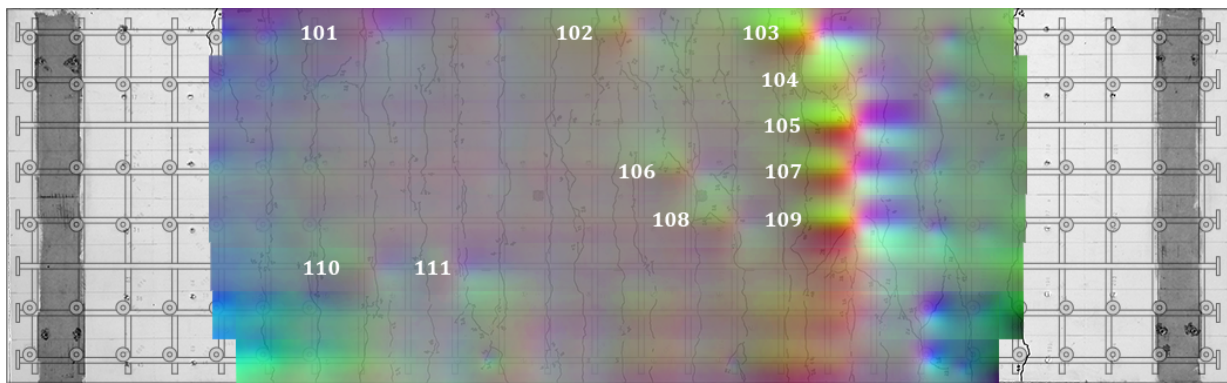


b) Korrelation zu Bruchsignal

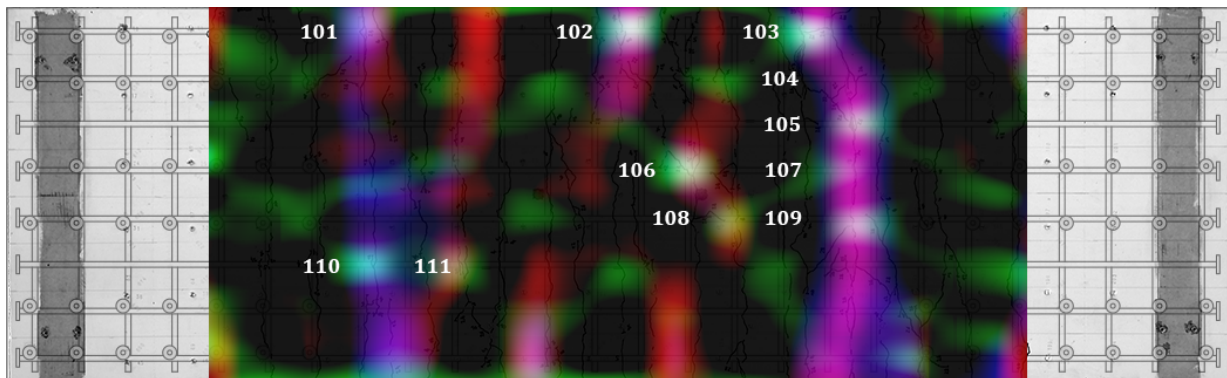


c) Schwellenwert auf 50%

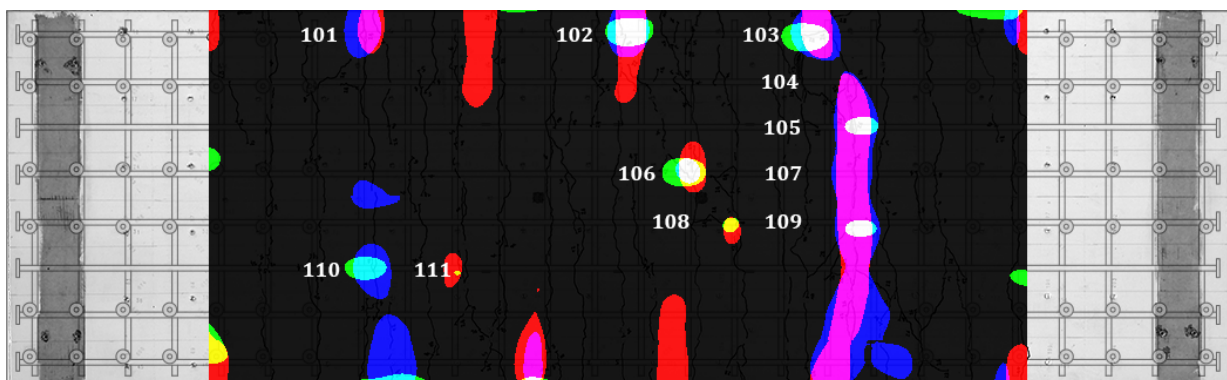
Abb. 7.5 Versuchskörper A1 bei Oberlast nach 1'140'040 Zyklen



a) Messbild

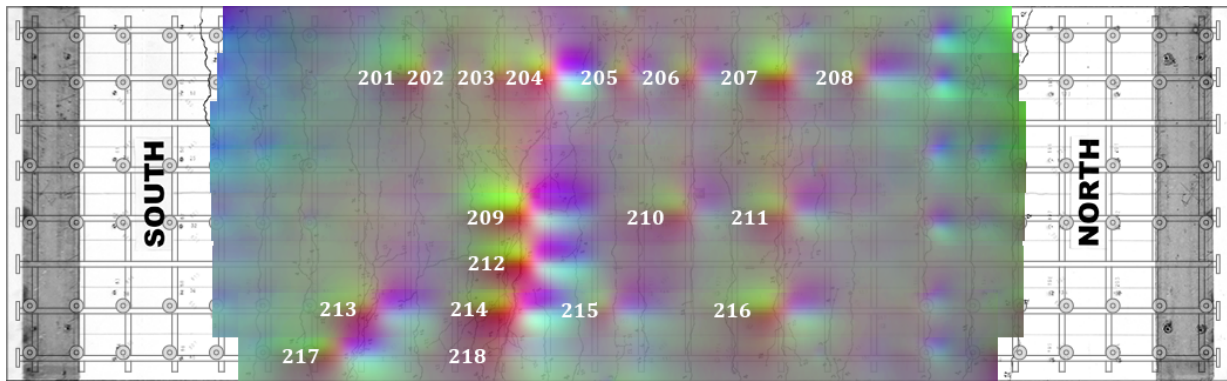


b) Korrelation zu Bruchsignal

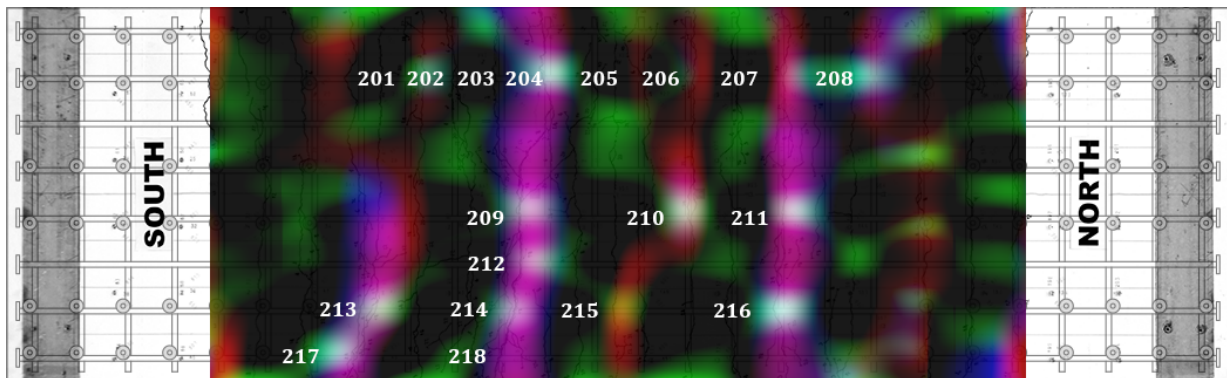


c) Schwellenwert auf 50%

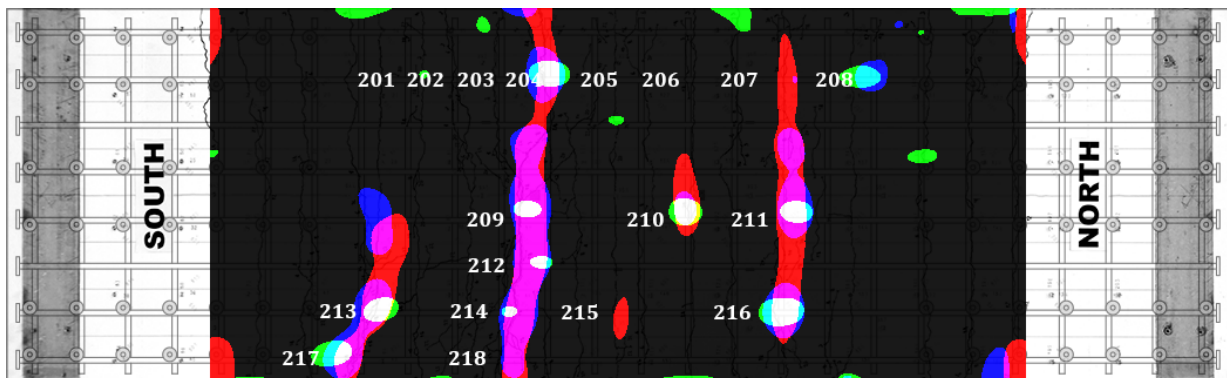
Abb. 7.6 Versuchskörper A1 bei Unterlast nach 1'140'040 Zyklen



a) Messbild

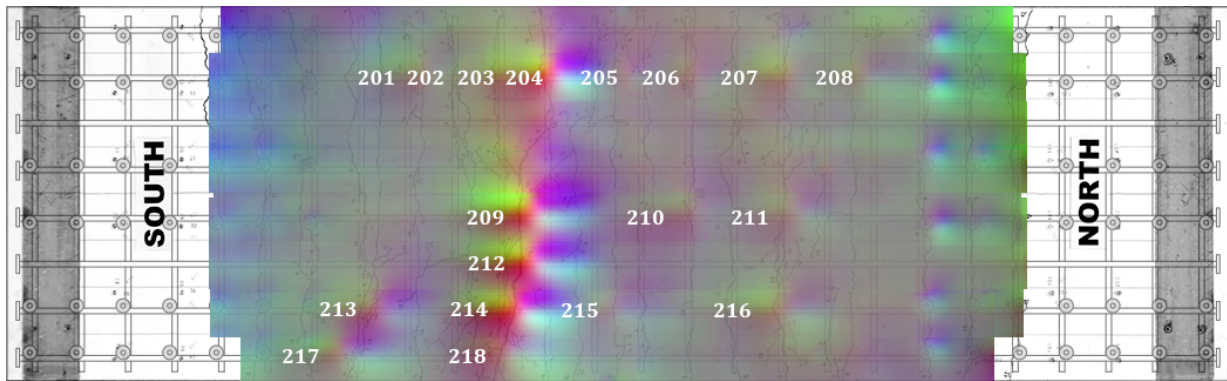


b) Korrelation zu Bruchsignal

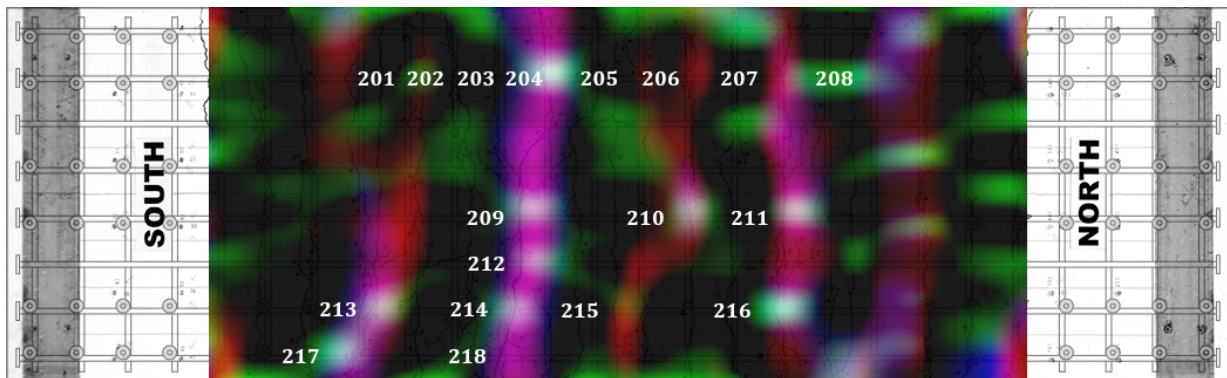


c) Schwellenwert auf 50%

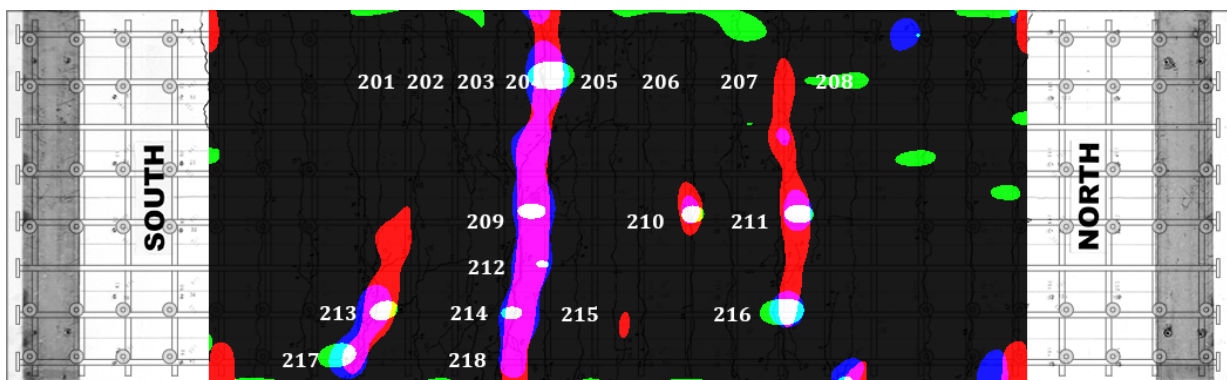
Abb. 7.7 Versuchskörper A2 bei Oberlast nach 825'514 Zyklen



a) Messbild

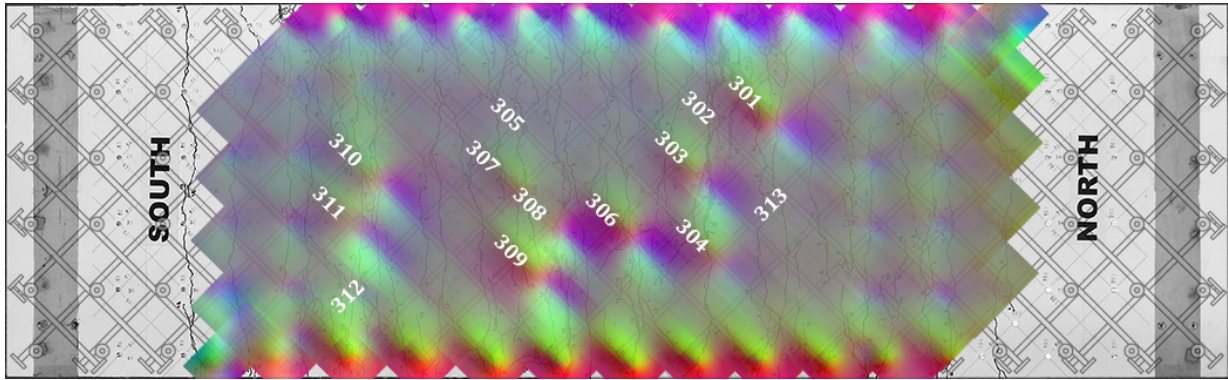


b) Korrelation zu Bruchsignal

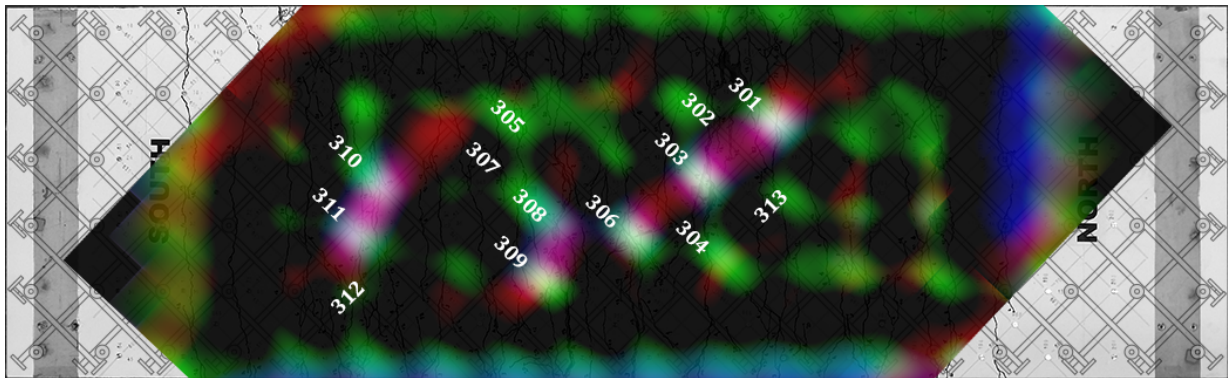


c) Schwellenwert auf 50%

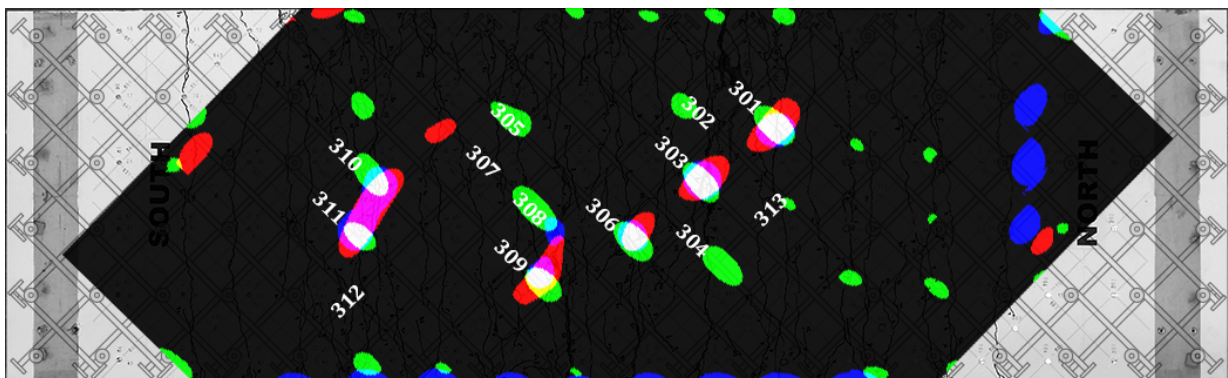
Abb. 7.8 Versuchskörper A2 bei Unterlast nach 825'514 Zyklen



a) Messbild

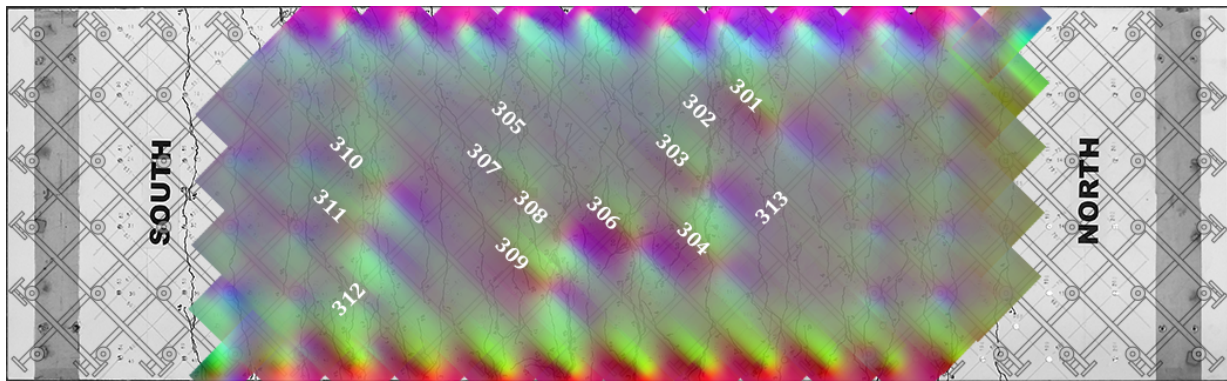


b) Korrelation zu Bruchsignal

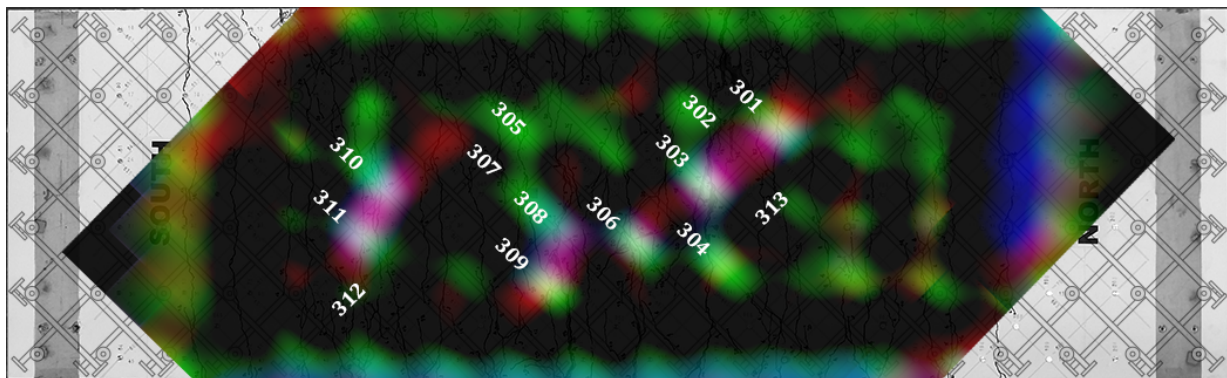


c) Schwellenwert auf 50%

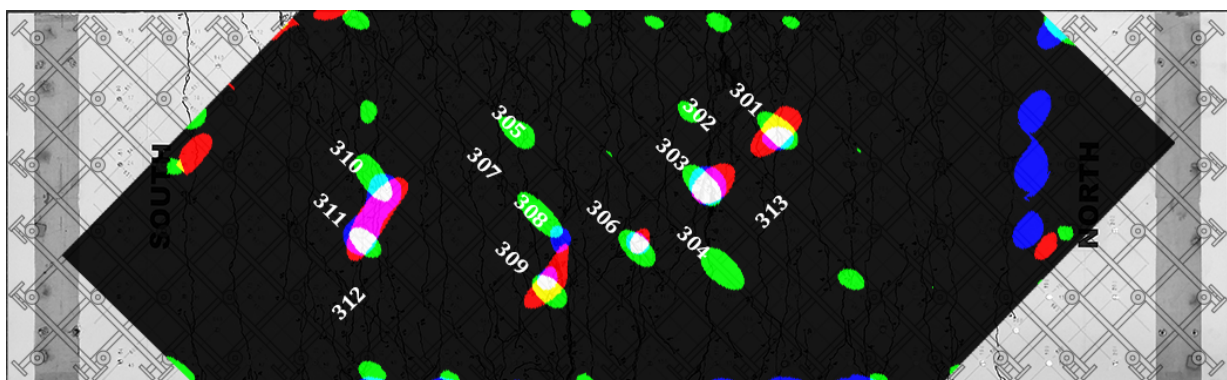
Abb. 7.9 Versuchskörper B1 bei Oberlast nach 271'345 Zyklen, 1. Lage



a) Messbild

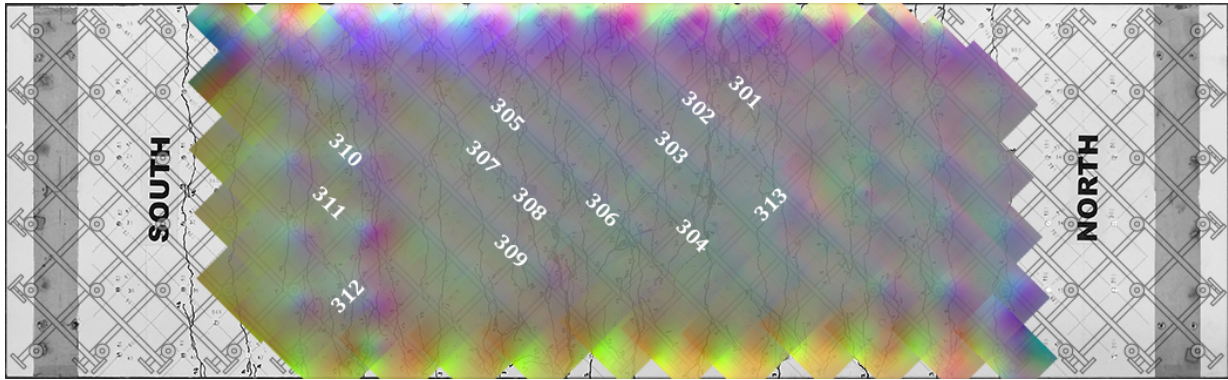


b) Korrelation zu Bruchsignal

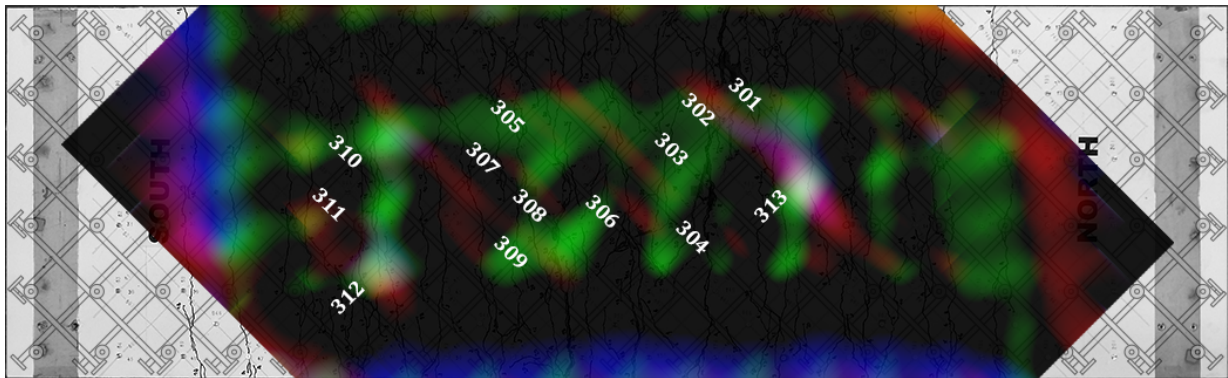


c) Schwellenwert auf 50%

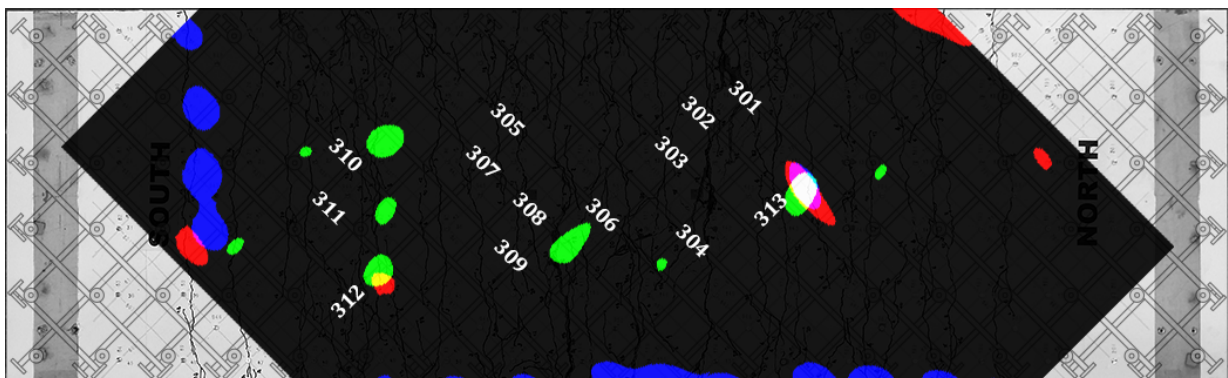
Abb. 7.10 Versuchskörper B1 bei Unterlast nach 271'345 Zyklen, 1. Lage



a) Messbild

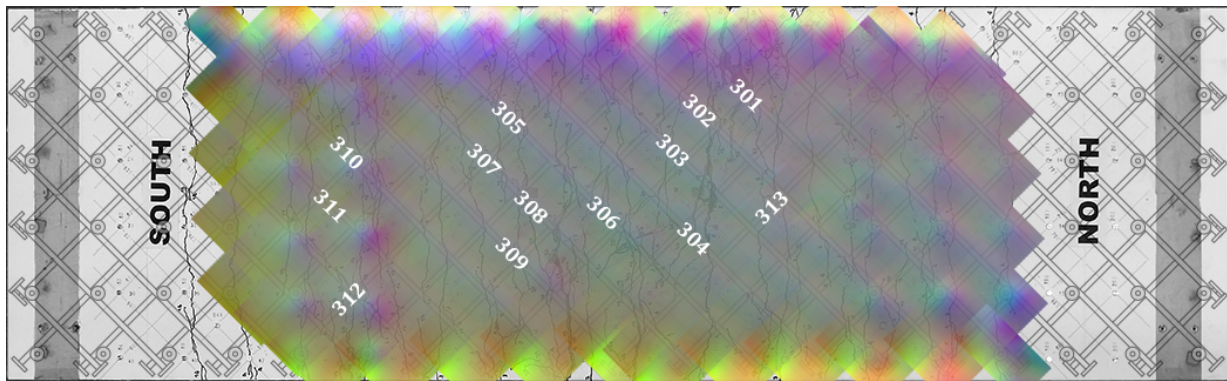


b) Korrelation zu Bruchsignal

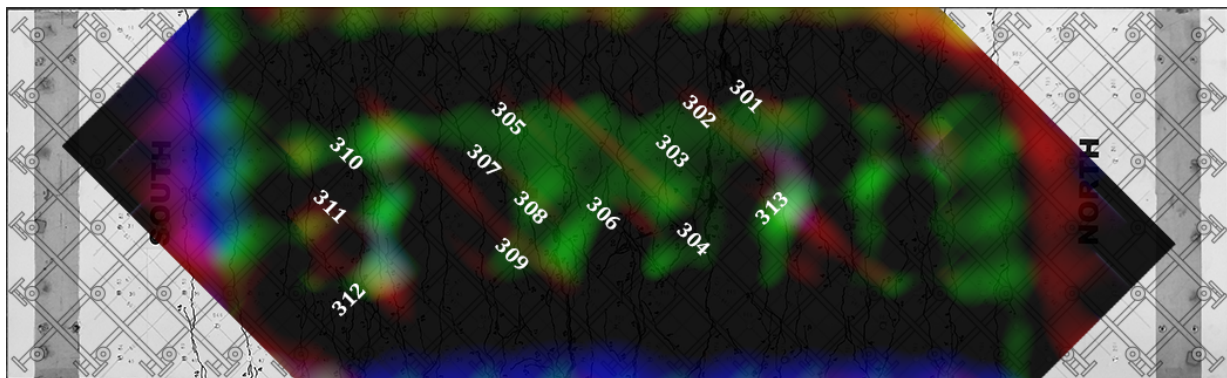


c) Schwellenwert auf 50%

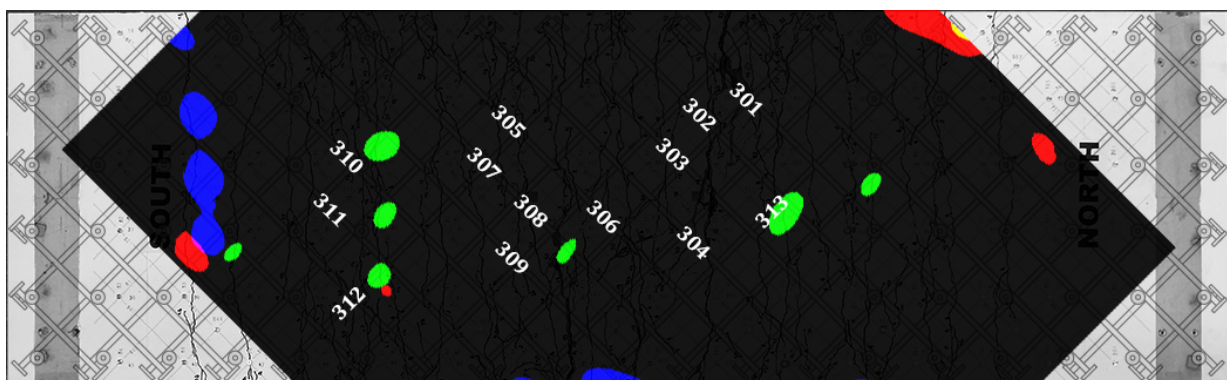
Abb. 7.11 Versuchskörper B1 bei Oberlast nach 271'345 Zyklen, 2. Lage



a) Messbild

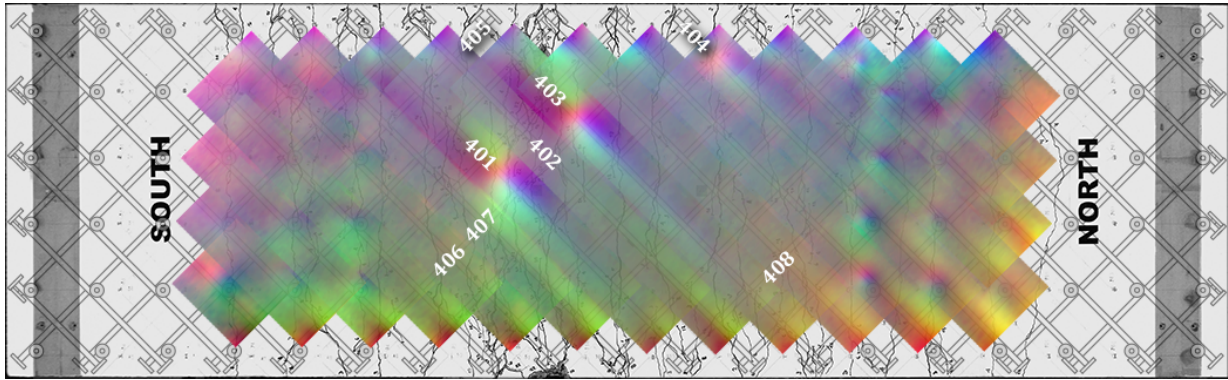


b) Korrelation zu Bruchsignal

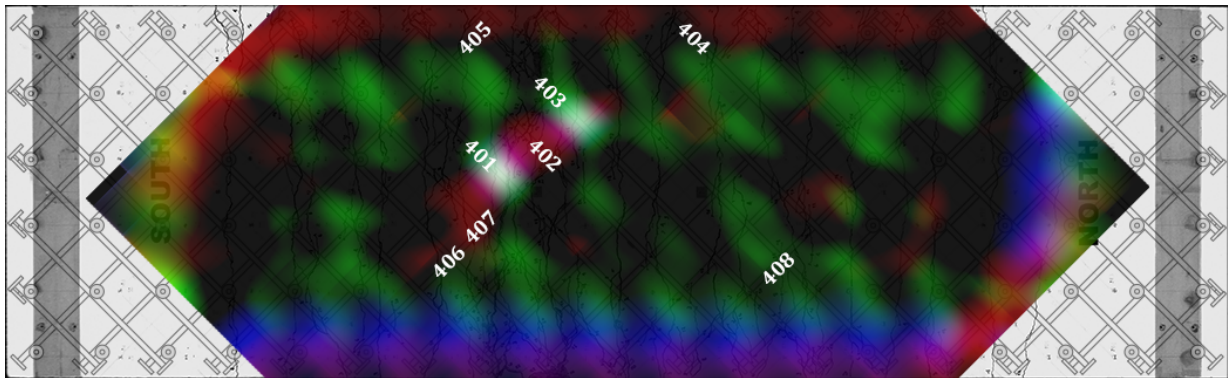


c) Schwellenwert auf 50%

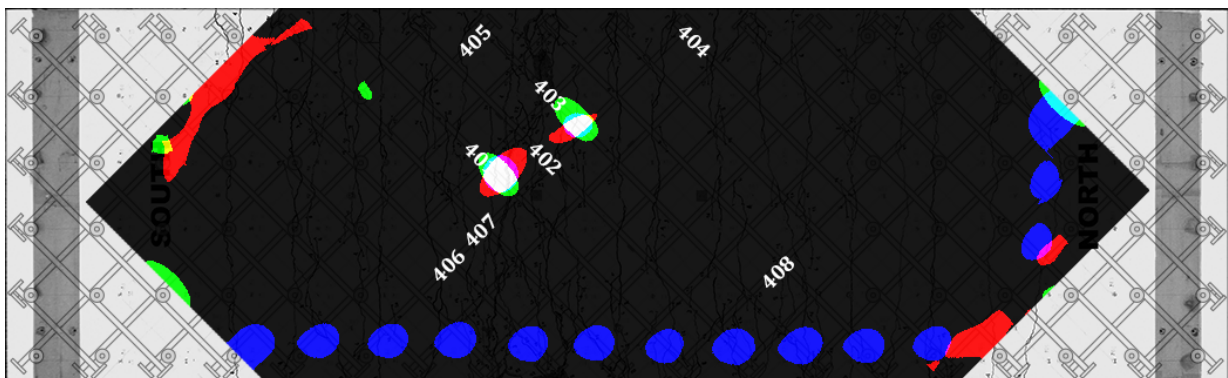
Abb. 7.12 Versuchskörper B1 bei Unterlast nach 271'345 Zyklen, 2. Lage



a) Messbild

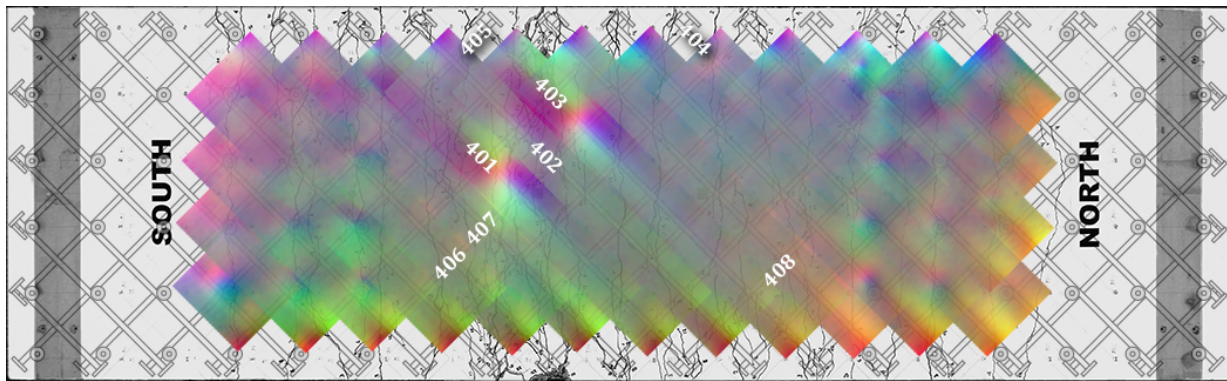


b) Korrelation zu Bruchsignal

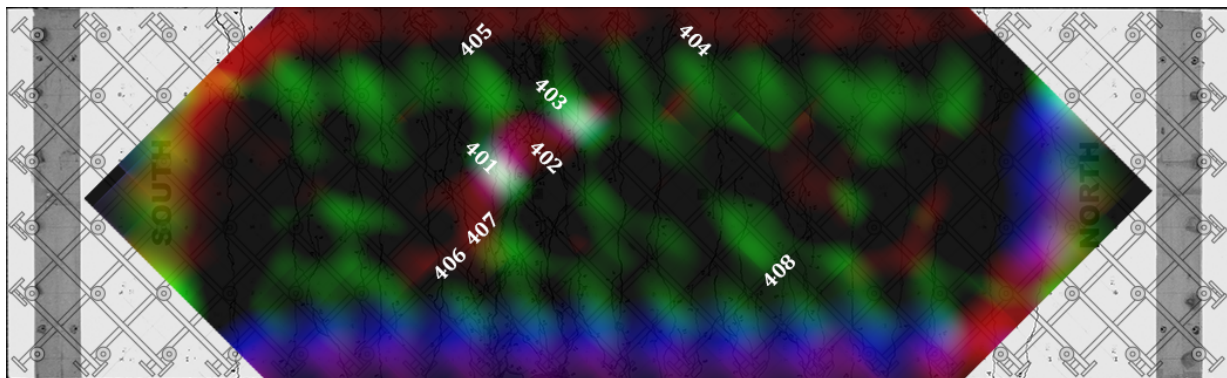


c) Schwellenwert auf 50%

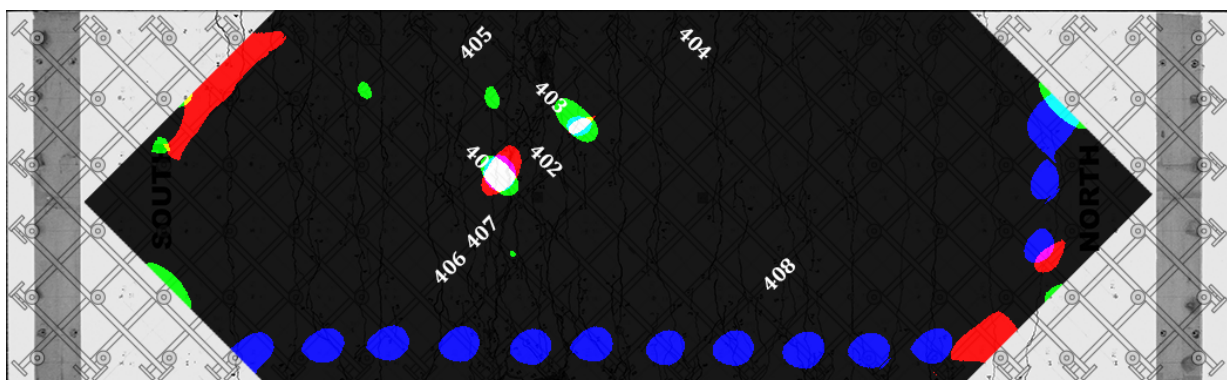
Abb. 7.13 Versuchskörper B2 bei Oberlast nach 219'728 Zyklen, 1. Lage



a) Messbild

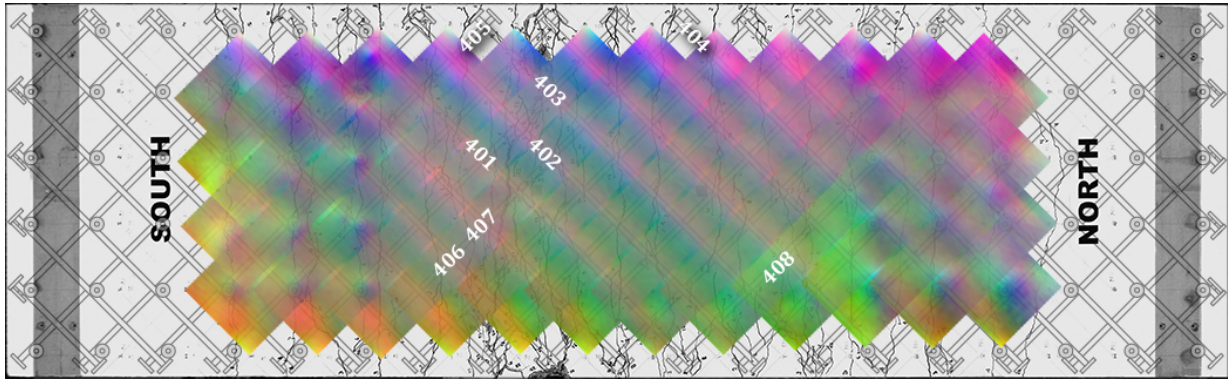


b) Korrelation zu Bruchsignal

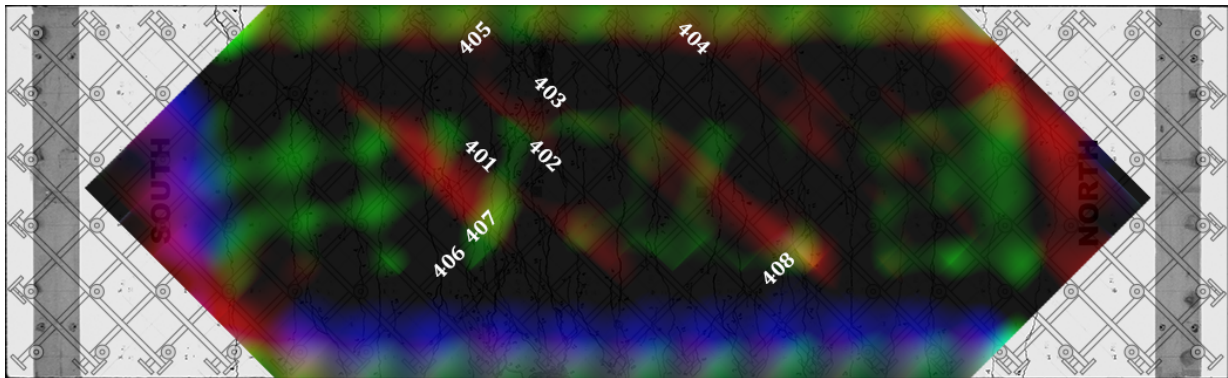


c) Schwellenwert auf 50%

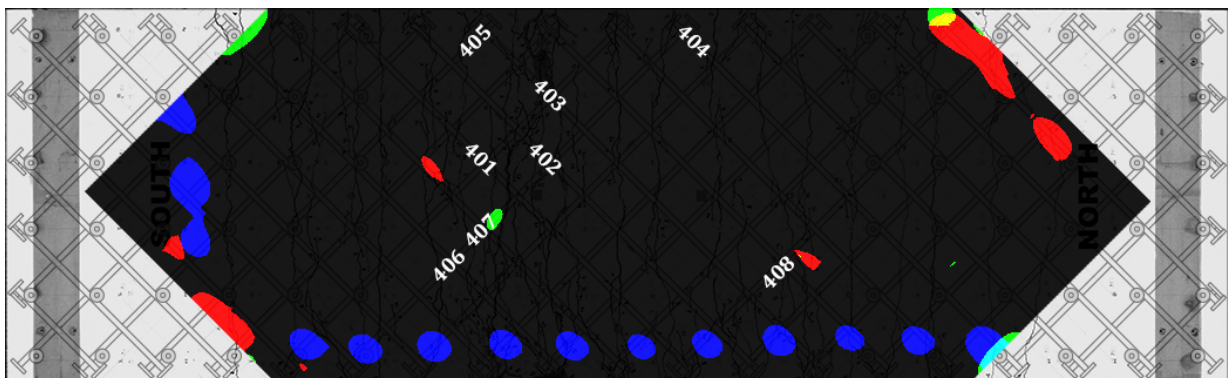
Abb. 7.14 Versuchskörper B2 bei Unterlast nach 219'728 Zyklen, 1. Lage



a) Messbild

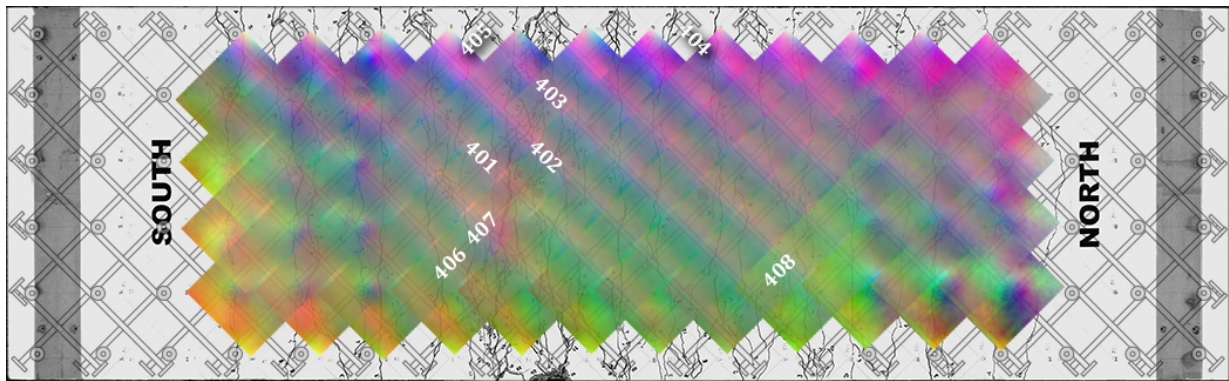


b) Korrelation zu Bruchsignal

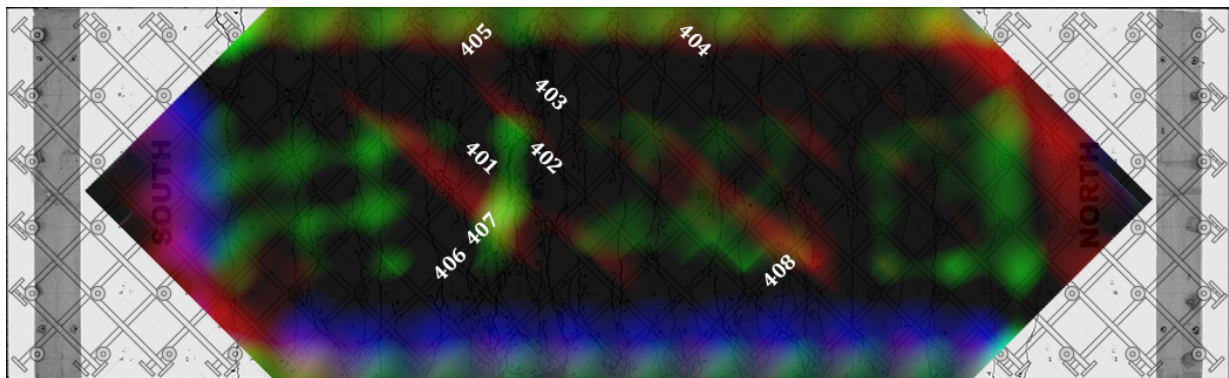


c) Schwellenwert auf 50%

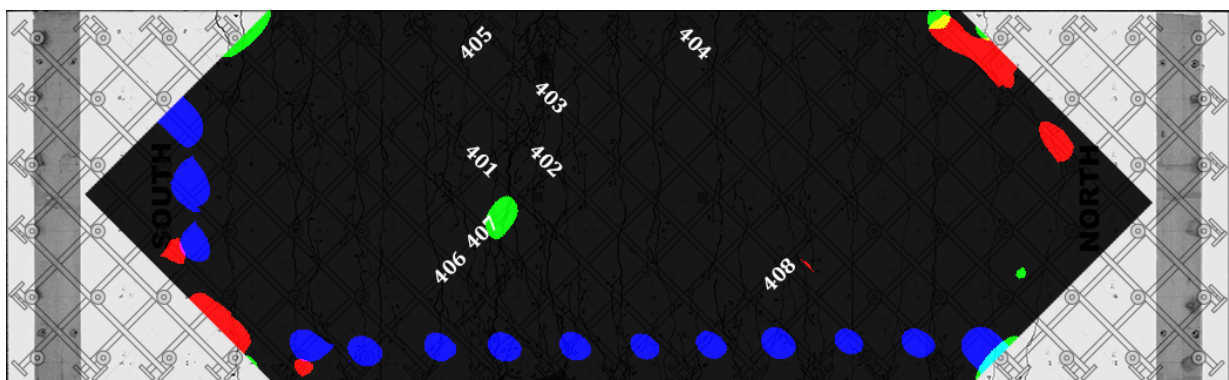
Abb. 7.15 Versuchskörper B2 bei Oberlast nach 219'728 Zyklen, 2. Lage



a) Messbild



b) Korrelation zu Bruchsignal



c) Schwellenwert auf 50%

Abb. 7.16 Versuchskörper B2 bei Unterlast nach 219'728 Zyklen, 2. Lage



a) Freigelegte Bewehrung



b) Bruch 101



c) Bruch 102



d) Bruch 103



e) Bruch 104



f) Bruch 105



g) Bruch 106



h) Bruch 107



i) Bruch 108



j) Bruch 109



k) Bruch 110



l) Bruch 111

Abb. 7.17 A1: Freigelegte Brüche nach 1'140'040 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)



a) Freigelegte Bewehrung



b) Bruch 201



c) Bruch 202



d) Bruch 203



e) Bruch 204



f) Bruch 205



g) Bruch 206



h) Bruch 207



i) Bruch 208



j) Bruch 209



k) Bruch 210



l) Bruch 211



m) Bruch 212



n) Bruch 213



o) Bruch 214



p) Bruch 215



q) Bruch 216

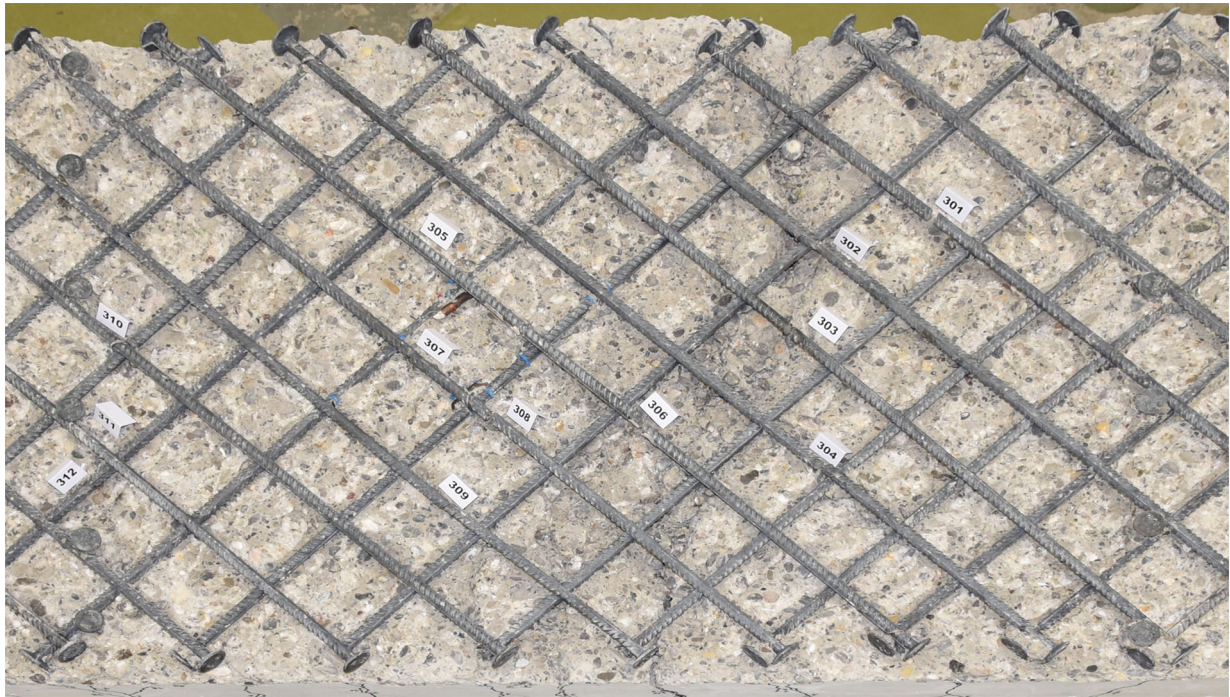


r) Bruch 217



s) Bruch 218

Abb. 7.18 A2: Freigelegte Brüche nach 825'784 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)



a) Freigelegte Bewehrung



b) Bruch 301



c) Bruch 302



d) Bruch 303



e) Bruch 304



f) Bruch 305



g) Bruch 306



h) Bruch 307



i) Bruch 308



j) Bruch 309



k) Bruch 310



l) Bruch 311



m) Bruch 312



n) Bruch 313

Abb. 7.19 B1: Freigelegte Brüche nach 271'524 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)



a) Freigelegte Bewehrung



b) Bruch 401



c) Bruch 402



d) Bruch 403



e) Bruch 404



f) Bruch 405



g) Bruch 406



h) Bruch 407



i) Bruch 408

Abb. 7.20 B2: Freigelegte Brüche nach 219'741 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)

Durch den Algorithmus konnten dagegen nur etwa die Hälfte der Brüche identifiziert werden. Sehr häufig konnten falsch negative Signale auf eine Überlagerung von Bruchsignalen zurückgeführt werden. Bei nahe beieinanderliegenden Brüchen wurde in der Regel immerhin das stärkere Bruchsignal als Schaden identifiziert. Damit relativiert sich die schlechte Quote etwas, da man immerhin auf eine Schadstelle aufmerksam wird, nur dass das Schadensausmass zunächst nicht korrekt bestimmt wird. Falsch positive Signale konnten grundsätzlich auf Randeffekte zurückgeführt werden.

Wie das Beispiel von Bruch 313 gezeigt hat, ist der entwickelte Algorithmus eine sinnvolle Ergänzung zum Messbild, kann aber eine gründliche Betrachtung des Messbildes nicht überflüssig machen.

7.3.9 Modifikationen des Algorithmus

Es wäre naheliegend, dem Algorithmus hinsichtlich seiner Schwächen weitere Einstellungsmöglichkeiten zu geben. Für das Problem von nahe beieinanderliegenden Bruchsignalen, die sich teilweise überlagern, gäbe es schon Lösungsansätze.

Wenn zwei in etwa gleich starke Bruchsignale sich teilweise überlagern, so sieht man vom einen Bruch nur die obere und vom anderen nur die untere Signalhälfte. Würde der Algorithmus also nur die Korrelation zu einem halben Signal anstatt zu einem ganzen suchen, würde die Empfindlichkeit für solche Signale steigen.

Andere Möglichkeiten, die ebenso einfach und schnell umsetzbar sind, wäre ein Vergleich mit einem kleineren Signalausschnitt eines Bruchsignals oder eine Reduktion der Schwellenwerte.

Allerdings entstand die Entwicklung des Algorithmus aus dem Wunsch nach einem objektiven und automatisierten Kriterium. Und so wäre es kontraproduktiv, den Algorithmus je nach Situation nachzustellen. Möchte man die falsch-negativen Signale bei überlagernden Signalen vermeiden, indem man die Parameter der Algorithmus verändert, so erkaufte man sich das durch falsch-positive Signale. Die Güte des Algorithmus als Bruchindikator wird dadurch nicht verbessert.

8 Feldversuche in Wildegg, Kanton Aargau

Für erste Feldversuche stellte die Firma TFB AG aus Wildegg einen Träger einer abgebrochenen Brücke zur Verfügung. Dieser stand auf dem Werkgelände der Firma für Messungen bereit.

8.1 Lehnenviadukt Wassnerwald, Kanton Uri

Beim Versuchskörper handelt es sich um einen Träger des Lehnenviadukt Wassnerwald aus dem Kanton Uri. Die Brücke ging als Teil einer Kantonsstrasse im Jahr 1969 in Betrieb. Im Jahr 1998 wurde der Überbau demontiert und anschliessend ersetzt. Grund für den Ersatz der Überbaus waren starke Korrosionserscheinungen, die spätestens seit 1993 bekannt waren. Diese waren auf eine schadhafte Abdichtung der Fahrbahn, sowie undichte Einlauftassen und Fahrbahnkonstruktionen zurückzuführen. Geringe Betonüberdeckungen von 15-20 mm, wie sie in vorfabrizierten Trägern der Sechzigerjahre üblich waren, ermöglichten eine rasche Ausbreitung der Schäden.

Bei der Demontage der Überbaus sicherte sich das Institut für Baustatik und Konstruktion einige Längsträger für Bruchversuche. Dabei wurde auf die weitgehend intakten mittleren Trägerreihen der insgesamt vier Träger zurückgegriffen. Die Ergebnisse der Bruchversuche von vier Trägern sind im Versuchsbericht [ZWICKY/VOGEL 2000] und in der Dissertation [ZWICKY 2002] dokumentiert.

Im Gegensatz dazu suchte sich die TFB AG gezielt einen der äusseren Träger wegen der Korrosionsschäden aus. Inwieweit die schlaaffe Bewehrung, wie sie in Abbildung 8.1 dargestellt ist, konstruktiv mit dem hier untersuchten Träger übereinstimmt, ist nicht bekannt, allerdings auch nicht entscheidend für die Beurteilung der Prüfmethode. Ein genauer Abgleich mittels Ferroskan oder ähnlicher Methoden fand nicht statt, jedoch erscheint die Übereinstimmung der tatsächlichen Situation mit der Bewehrungsskizze plausibel, soweit es an den Stellen mit abgeplatzter Überdeckung ersichtlich ist.

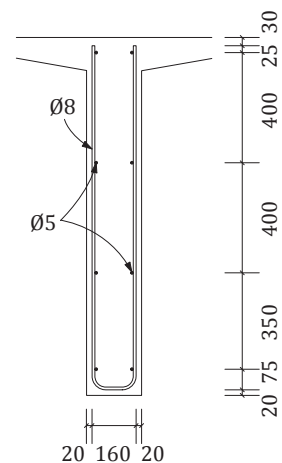
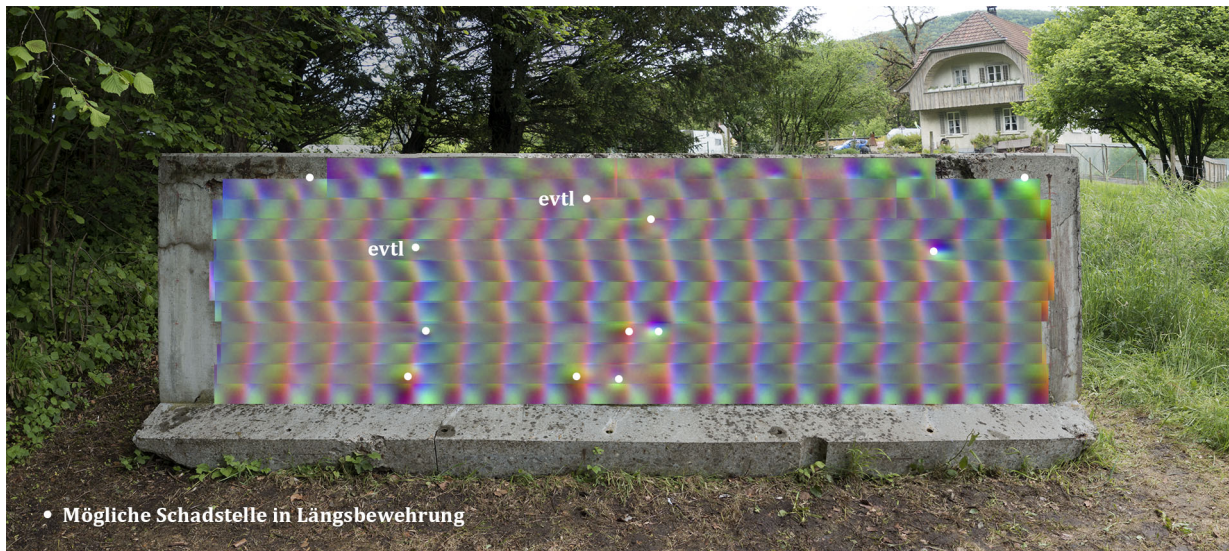


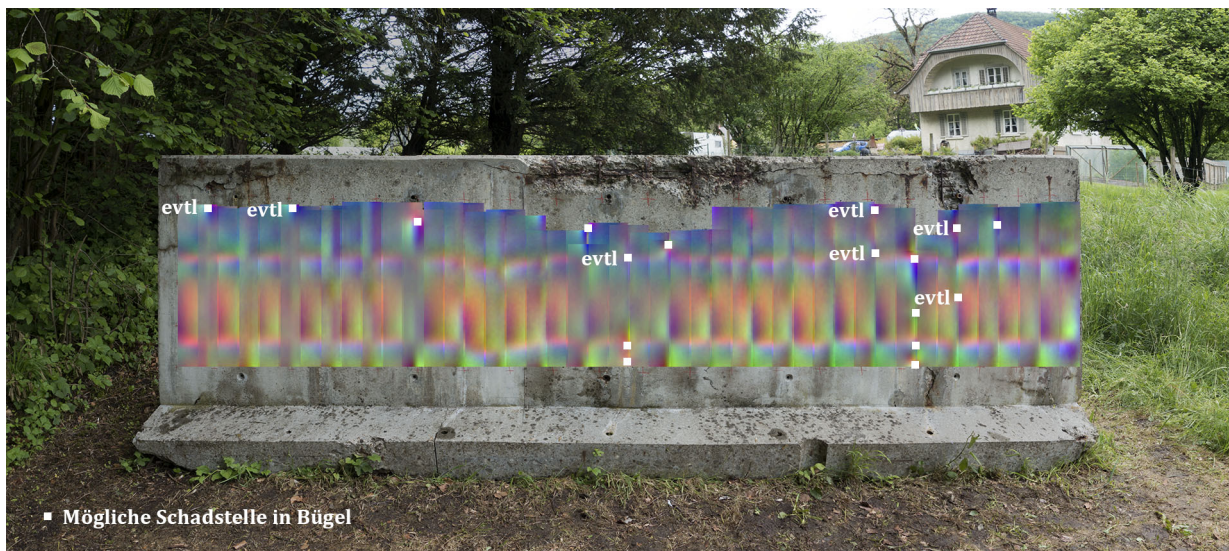
Abb. 8.1 Bewehrungsskizze aus [ZWICKY/VOGEL 2000]

8.2 Ablauf und Auswertung der Messungen

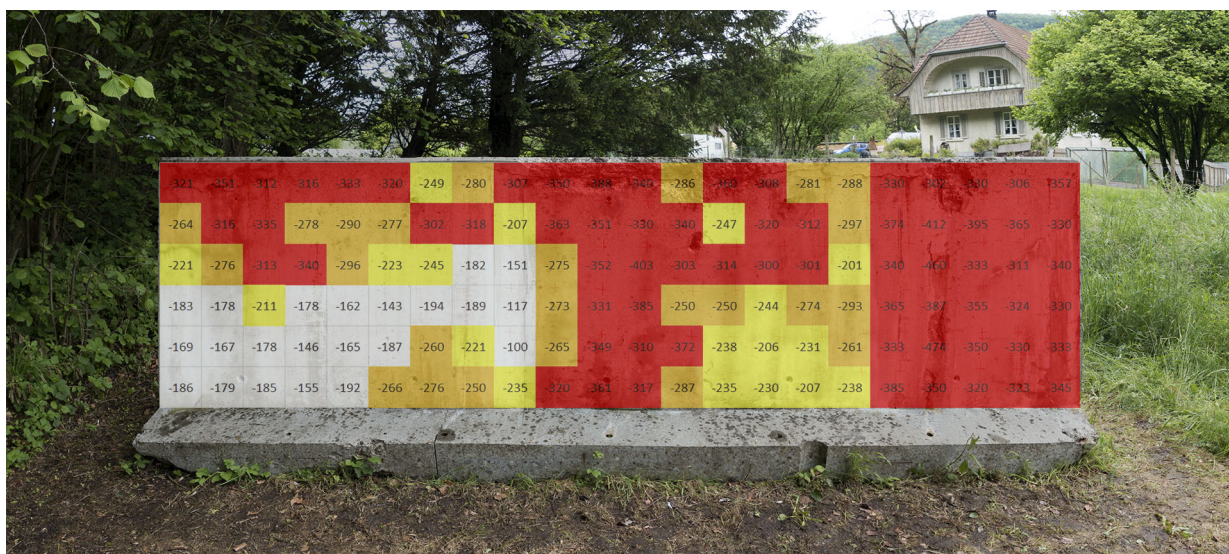
Vom Träger wurde diejenige Seite grossflächig vermessen, die besonders dem chloridhaltigen Wasser der Belagsentwässerung ausgesetzt war. Die Messung wurde in beide Bewehrungsrichtungen durchgeführt: In horizontaler



a) Messung der Längsbewehrung



b) Messung der Bügel



c) Korrosionspotential in mV, gemessen mit Handelektrode

Abb. 8.2 Längsträger und überlagerte Messwerte mit Interpretation

Fahrtrichtung wurde die Längsbewehrung überprüft, während die Bügel als Störsignal sichtbar werden; in vertikaler Richtung wurden die Bügel überprüft, während die Längsbewehrung als Störsignal sichtbar wird. Die einzelnen Messbahnen wurden überlappend gefahren, um sicher zu gehen, dass die Fläche vollständig erfasst wird.

In Abbildung 8.2 ist der Träger mit den überlagerten Messwerten abgebildet. Die Messbahnen sind jeweils kürzer als der Träger, was im Längenmass des Messwagens begründet liegt. Im oberen Bereich der Trägers konnten einige Flächen praktisch nicht mehr vermessen werden, da dem Messwagen hier ein intakter Untergrund für die Räder fehlte, ohne den eine saubere Erfassung der zurückgelegten Distanz nicht möglich ist. In diesen Bereichen wäre der Zustand auch durch eine rein visuelle Kontrolle als alarmierend eingestuft worden.

Die Auswertung der Messwerte wurde anschliessend im Büro vorgenommen. Dabei wurden alle Messbahnen einzeln und getrennt nach Komponenten einer gründlichen Betrachtung unterzogen. Es wäre problematisch gewesen, die Auswertung lediglich am grossen flächigen Messbild vorzunehmen. Ungenauigkeiten in der Wegmessung könnten zusammen mit der Überlagerung der Messbahnen dazu führen, dass Bruchsignale bis zur Unkenntlichkeit abgeschwächt werden. Ein Messfehler von etwa 5 cm auf 4 m erscheint zwar relativ gering, die Auswirkung des absoluten Fehlers wird jedoch durch den scheinbar krummen Verlauf der Bewehrung quer zur Messrichtung offensichtlich.

Insgesamt war die Auswertung sehr fordernd und hat wesentlich mehr Zeit als erwartet in Anspruch genommen. Der entwickelte Algorithmus hat in diesem Fall kaum weitergeholfen. Die Tatsache, dass das Bewehrungslayout im Gegensatz zu den Ermüdungsversuchen nur sehr grob bekannt war, hat die Beurteilung von Unregelmässigkeiten im Messbild stark erschwert.

Die Interpretation der Messwerte wurde vor der Sondierung durchgeführt und dokumentiert. Ganz blind war die Versuchsdurchführung dennoch nicht, da sich einige Schäden durch Rostspuren, Abplatzungen und Hohlstellen schon während der Messung erahnen liessen. Die Stellen, die durch den Autor als Schaden oder mögliche Schaden beurteilt wurden, sind auf den Messbildern markiert. Einige dieser Stellen wurden im Anschluss sondiert.

8.3 Sondage zur Verifizierung der Schäden

Insgesamt wurde an fünf Stellen eine örtliche Sondage gestattet. Die Sondagestellen wurden von Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld von der Firma TBF AG ausgewählt, die auch eine flächige Potentialfeldmessung des Trägers durchgeführt hat. Die Sondagestellen wurden dabei so ausgesucht, dass sowohl Stellen mit auffälligem, wie auch mit unauffälligem Korrosionspotential untersucht wurden. Die einzelnen Sondierfenster sind in Abbildung 8.3 dargestellt und werden im Folgenden kommentiert:



a) Messung der Bügel



b) Sondage 1



c) Sondage 2



d) Sondage 3



e) Sondage 4



f) Sondage 4: Abgelöstes Stück Stahl



g) Sondage 5

Abb. 8.3 Sondagestellen (mit Phenolphthaleinlösung besprüht)

Sondage 1

Hier wurde im Bügel ein mögliches Schadsignal interpretiert. Das Korrosionspotential war unauffällig. Bei der Öffnung zeigte sich ein intakter Stab in nicht karbonatisiertem Beton. Dieses falsch positive Ergebnis ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass eine Interpretation unmittelbar am Ende der Messbahn versucht wurde. Unmittelbar am Anfang und am Ende einer Messbahn sollten grundsätzlich keine Aussagen getroffen werden, da dort keine saubere Magnetisierung garantiert werden kann.

Sondage 2

Wie bei der ersten Sondage wurde auch hier bei unauffälligem Korrosionspotential ein intakter Stab in nicht karbonatisiertem Beton vorgefunden. Die Interpretation des Autors als Schadsignal in der Längsbewehrung erwies sich als falsch. Tatsächlich handelt es sich hier um ein Stabendsignal, da ein Stab ohne Übergang endet. Hier und in vergleichbaren Fällen besteht grundsätzlich eine Verwechslungsgefahr.

Sondage 3

An der dritten Sondagestelle wurde ein sehr auffälliges Korrosionspotential festgestellt. Im Gegensatz dazu konnte durch die Streufeldmethode nur ein schwaches, mögliches Schadsignal im Bügel festgestellt werden. Die Sondierung zeigte einen Stab, der sich zu einem kleinen Teil im karbonatisierten Beton befand und bereits einen kleinen Querschnittsverlust von ca. 30% aufwies.

Während die Potentialfeldmessung den aktuellen Vorgang der Korrosion misst, kann mit der magnetischen Streufeldmessung eine Aussage über den aufsummierten Schaden des vergangenen Korrosionsprozesses getroffen werden. Nimmt man beide Methoden zusammen, entsteht ein sehr differenziertes Bild vom Zustand des Bauwerks, wie an diesem Beispiel gezeigt werden konnte.

Sondage 4

Neben einem auffälligen Korrosionspotential wurden hier für einen Bügel gleich zwei Schadsignale direkt übereinander festgestellt. Die Öffnung gestaltete sich hier einfach, da grosse Teile des Betons schon bei kleiner mechanischer Einwirkung abplatzten, obwohl die Stelle optisch zunächst unauffällig schien.

Es zeigte sich ein interessantes Schadensbild, da der Querschnitt des Stabes sich der Länge nach gespalten hatte und ein längliches, flaches Stück aus Stahl und Rost auf dem intakten Restquerschnitt lag, aber keinen festen Verbund mehr hatte. Die zwei Schadsignale kamen vermutlich daher, dass das Magnetfeld vom Bewehrungsstab in dieses Stahlstück und am Ende des Stahlstückes wieder in den Bewehrungsstab geflossen ist und sich bei jedem

Materialwechsel ein Streufeld ausbildete. Der Querschnittsverlust betrug hier ca 80%.

Sondage 5

Die fünfte und letzte Sondagestelle war bereits optisch sehr auffällig. Neben einem auffälligen Korrosionspotential wurde hier ein Schadsignal im Bügel detektiert. Die Sondierung zeigte eine Karbonatisierungstiefe bis etwa mittig des Stabes und einen entsprechenden Querschnittsverlust von ca. 40%.

8.4 Erkenntnisse und Fazit

Trotz einiger Erfahrungen mit der Methode, die während der Begleitung der Ermüdungsversuche gesammelt werden durften, gestaltete sich die Interpretation der Messwerte am echten Bauwerk schwieriger als erwartet. Im Gegensatz zu den Ermüdungsversuchen sind hierbei auch falsch-positive Ergebnisse aufgetreten.

Eine wichtige, aber nicht ganz neue Erkenntnis ist, dass eine Verwechslungsgefahr zwischen Stabanfangs-, Stabend-, Stoss- und Bruchsignal bestehen kann. Diese Signale sind grundsätzlich nicht gleich, die Differenzierung kann allerdings durch Störsignale in der Nähe verunmöglicht werden.

Gerade bei grösseren Bauteilen besteht bei der Wegmessung noch Verbesserungspotential. Hier gäbe es verschiedene Lösungsansätze: Anstelle eines einzigen Wegaufnehmers könnte jedes Rad oder jede Achse mit einem eigenen Wegaufnehmer ausgestattet werden. Differenzen zwischen den einzelnen Wegaufnehmern könnten softwaremässig korrigiert werden. Externe Lösungen zur Ortung, wie beispielsweise ein Tachymeter sind denkbar, widersprechen aber der Idee eines mobilen Handgerätes. Eine elegante Lösung wäre eine Korrektur über die erfassten Messdaten des Magnetfeldes. Würde man die Störsignale der Querbewehrung, die regelmässig als deutlicher Hochpunkt in der x-Koordinate in Erscheinung treten, in allen Messbahnen auf gleiche Linie bringen, könnten kleine Wegdifferenzen ausgeglichen werden.

Die Potentialfeldmessung ist eine bewährte und gängige zerstörungsfreie Prüfungsmethode in der Bauwerkserhaltung. Sie dient dazu, aktive Korrosionsprozesse im Stahlbeton zu detektieren. Damit ist eine Momentaufnahme über den aktuellen Schädigungsvorgang möglich. Über die Korrosionsschäden, die sich in der Vergangenheit aufkumuliert haben, kann aus den Messwerten der Potentialfeldmessung keine direkte Aussage getroffen werden. Der Einsatz der magnetischen Streufeldmethode ist hier eine sinnvolle Ergänzung, da sich damit Orte mit Materialverlusten lokalisieren lassen.

9 Schlussfolgerungen

Die magnetische Streufeldmethode ist bis heute im Bauwesen praktisch von sehr geringer Bedeutung. Dies, obwohl es für die zerstörungsfreie Inspektion der Bewehrung keine überzeugende Alternative gibt.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass nicht nur Brüche, sondern auch Materialverluste, wie sie durch Korrosion verursacht werden, grundsätzlich detektierbar sind. Mit der Ausweitung der Methode auf Korrosionsschäden tut sich ein grosser praktischer Anwendungsbereich auf. Die Detektion der Brüche beschränkte sich dabei auf Laborprüfkörper und die der echten Korrosionsschäden auf einen Trägerschnitt. Allgemeingültige Aussagen zur Detektionsrate oder zu den Anwendungsgrenzen der Methode sind damit nicht möglich. Es darf aber festgehalten werden, dass die zerstörungsfreie Detektion von Schäden in der schlaffen Bewehrung bisher nicht mit der hier erzielten Erfolgsquote möglich war.

Die Praxistauglichkeit konnte entscheidend verbessert werden, indem bei der Messgeschwindigkeit, der Handhabung und der Detektionsquote deutliche Fortschritte gemacht wurden. Bis zum Niveau eines kommerziellen Prüfgerätes besteht noch Entwicklungspotential.

9.1 Weiterentwicklung

Ein wichtiges Ziel war, anstelle der stabweisen Messungen eine flächige Messung durchführen zu können. Praktische Gründe sind, dass unter Umständen mehrere Stäbe gleichzeitig erfasst werden können und die genaue Position der Bewehrung vorher nicht ermittelt werden muss. Lediglich die Ausrichtung der Stäbe muss bekannt sein.

Die Verbesserung von Messgeschwindigkeit, Auflösung und Handhabung waren mehr die Problemstellungen eines Entwicklers und weniger wissenschaftliche Fragestellungen. Diese Schritte waren aber unverzichtbar, damit der Sprung vom Laborversuch zum Feldversuch gelingen konnte, um so neue Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der Methode zu gewinnen.

9.2 Erkenntnisse

Die flächige Messung hat nicht nur praktische Gründe, sondern enthält auch nutzbar mehr Informationen. Da die y-Komponente unmittelbar über

dem Stab null ist und auch über einer Schadstelle null bleibt, wurde sie in vielen Forschungsarbeiten nicht erfasst bzw. nicht ausgewertet. Erst in der flächigen Messung kann die y-Komponente zur Identifizierung von Schadstellen ausgewertet werden. Die Messung gewinnt damit weiter an Präzision.

9.2.1 Auswertungen

Betrachtet man stabweise Messungen, so erhält man für jeden Stab zwei Graphen für die Feldstärke, einen für die x- und einen für die z-Koordinate. Für ein mathematisches Bruchkriterium werden üblicherweise im Rahmen einer Kurvendiskussion lokale Maxima bzw. Minima und Wendepunkte gesucht. Gewisse Kombinationen ergeben ein Bruchsignal.

Dieses Vorgehen wäre bei einer flächigen Messung theoretisch genauso möglich. Zusätzlich zu einer Kurvendiskussion der Messwerte entlang dem Stab, könnten sogar noch die Graphen der Messwerte quer zum Stab untersucht werden. Es gelingt damit aber nicht, den Informationsgehalt der flächigen Messung angemessen auszunutzen. Ausserdem hat sich die Analyse einzelner Messgraphen als sehr anfällig gegenüber Störsignalen erwiesen.

Es musste daher eine neue Herangehensweise gefunden werden, die eine möglichst vollständige Nutzung der gewonnenen Messdaten ermöglicht. Evaluert wurden neuronale Netze und Template Matching mittels Korrelationskoeffizient.

Die Nutzung von neuronalen Netzen war wenig erfolgreich - was nicht heisst, dass nicht bessere Ergebnisse möglich wären. Zum aktuellen Projektstand konnten die neuronalen Netze nicht zur Auswertung der Versuche genutzt werden.

Erfolgreicher war das Template Matching mittels Korrelationskoeffizient. Diese Methode wird dem Charakter der Messbilder gerecht und eignet sich gut, das Bruchsignal zu erkennen und hervorzuheben.

Die Untersuchung von verschiedenen Bewehrungsanordnungen wird in der Dissertation von [WOLF 2012] noch als Forschungsbedarf genannt. Mit den Erkenntnissen, die mittlerweile aus den flächigen Messungen und Auswertungen vorliegen, relativiert sich das Problem von unbekannten oder ungewöhnlichen Bewehrungsanordnungen deutlich.

Durch den höheren Informationsgehalt der flächigen Messungen können Bruchsignale sehr zuverlässig von anderen Störsignalen unterschieden werden. Das ist ein entscheidender Vorteil, da die Bewehrungsanordnungen sehr uneinheitlich sein können und im Falle eines Erhaltungsproblems nicht zwangsläufig bekannt sind.

Nach wie vor erfordert die Interpretation eine gründliche Betrachtung der Messwerte und ein gewisses Mass an Erfahrung.

9.2.2 Verschiedene Schadensarten

Untersucht wurden Brüche durch Ermüdung und Verformung und Materialverluste durch Korrosion. Die Schäden waren überwiegend echt, in einigen Fällen wurden Stäbe auch mittels Sägen und Schleifen präpariert. Die Versuchsergebnisse wurden überwiegend aus nicht-blinden Versuchen gewonnen, das bedeutet, das Soll-Ergebnis war vor der Auswertung bekannt. In einigen Fällen wurden die Versuche fast-blind durchgeführt, indem die Ergebnisse vor der Sondierung dokumentiert wurden. Visuell konnten auch hier im Voraus Vermutungen über den Zustand angestellt werden.

Die Auswertungen und Erfahrungen zeigen, dass sich verschiedene Schäden im Bereich üblicher Überdeckungen mit guter Sicherheit detektieren lassen. Die Art und das Ausmass des Schadens lassen sich nicht bestimmen, auch nicht näherungsweise. Nach Einschätzung des Autors ist eine Quantifizierung des Schadens mit der magnetischen Streufeldmethode grundsätzlich nicht möglich, da die Ausprägung des Schadsignales von zu vielen Faktoren abhängig ist.

9.2.3 Verschiedene Magnetisierungseinrichtungen

Obwohl das Forschungsfeld zur magnetischen Streufeldmethode im Bauwesen recht überschaubar ist, finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Magnetisierungseinrichtungen.

Die Magnetisierung kann entweder über einen Permanentmagnet oder einen Elektromagnet erfolgen, die Messung erfolgt entweder innerhalb der Magnetisierungseinrichtung (aktiv) oder nachlaufend (remanent). In der Literatur sind Prototypen mit unterschiedlichen Geometrien von Permanentmagneten oder Kernen von Elektromagneten dokumentiert. Dem Autor ist allerdings für die Streufeldmethode im Bauwesen bisher kein Konzept bekannt, dessen Elektromagnete ohne Kern bzw. Joch auskommen.

In diesem Punkt stellt der Prototyp aus diesem Projekt eine Neuheit dar und könnte der Prüfmethode im Bauwesen dank der erzielten Gewichtsersparnis zu einem Durchbruch verhelfen. Die Befürchtungen, dass die Signalstärke nicht ausreichen könnte, haben sich nicht bewahrheitet.

Unterschiede in der Magnetisierungseinrichtung wirken sich qualitativ grundsätzlich nicht auf die Signalbilder von Schäden oder Bewehrungsanordnungen aus. Die Wahl der Magnetisierungsart hat in erster Linie Auswirkungen auf die Handhabung, auf die Signal- und Feldstärke und somit auch auf die Wahl der Sensoren. Allenfalls hat die Geometrie der Magnetisierung noch Auswirkungen auf die Messtiefe und die Dimension des Bruchsignals.

9.3 Weiterer Forschungsbedarf

Verbesserungspotential gibt es in vielen Teilbereichen der Methode. Nicht alle Problemstellungen sind tatsächlich wissenschaftlicher Natur. Vieles ist auch

eine Entwicklungsaufgabe.

So waren einige Entwicklungsschritte aus diesem Projekt nur aufgrund der Fortschritte aus anderen technischen Gebieten möglich. Einige Forschungsprojekte aus der Vergangenheit konnten noch nicht auf günstige Kleincomputer wie beispielsweise den Arduino zurückgreifen und hatten weit weniger gute und weniger benutzerfreundliche technische Hilfsmittel zur Verfügung, was die Messung, Datenübertragung und Analyse betrifft. Der zu erwartende Fortschritt auf diesen Gebieten wird die künftige Entwicklungsarbeit weiter vereinfachen.

Klassische Entwicklungsaufgaben sind eine weitere Professionalisierung von Software, Positionierung, Messgeschwindigkeit und Auflösung. Wissenschaftliche Aufgaben wären die Verbesserung der Mustererkennung oder die Erarbeitung eines völlig neuen Konzeptes dazu.

Quantitative Aussagen über Feldstärken können im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht getroffen werden. Es ist nicht bekannt, welches Feld durch die verwendeten Magnetisierungseinrichtungen tatsächlich auf die Bewehrung wirkt. Ebenso bleibt unbeantwortet, ob die Sättigung im Stahl erreicht wurde und ob das Erreichen wichtig ist. Weitere Erkenntnisse zu diesen Fragen würden eine bessere Dimensionierung der Gerätschaften ermöglichen, wodurch weiteres Gewicht gespart werden kann. Simulationen dazu sollten grundsätzlich durch geeignete Experimente kalibriert werden.

Langfristig denkbar wäre eine Kombination mit anderen Prüfverfahren, vor allem mit solchen aus der Lokalisierung der Bewehrung. Physikalisch ist eine Kombination möglich, da das Gleichfeld der magnetischen Streufeldmethode keine Interferenzen etwa mit dem Wechselfeld der Induktion und den Radiowellen eines Radars verursacht. Das Konzept eines solchen Gerätes und eine integrierte Auswertung der Messwerte ist nicht trivial.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Brücken im Nationalstrassennetz nach Jahr der Inbetriebnahme, nach [VOGEL <i>et al.</i> 2009]	15
2.1	Thales von Milet	19
2.2	Plinius der Ältere	19
2.3	Lukrez	19
2.4	Petrus Peregrinus magnetisches „Perpetuum Mobile“	20
2.5	William Gilbert	20
2.6	Charles Augustin de Coulomb	20
2.7	Siméon Denis Poisson	20
2.8	Hans Christian Ørsted	21
2.9	André Marie Ampère	21
2.10	Wilhelm Eduard Weber	21
2.11	Michael Faraday	21
2.12	James Clerk Maxwell	22
2.13	Heinrich Rudolf Hertz	22
2.14	Pierre Curie	22
2.15	Paul Langevin	22
2.16	Quellen des Magnetismus, nach [TIPLER/MOSCA 2009]	23
2.17	Diamagnetismus, aus [WOLF 2012]	26
2.18	Paramagnetismus, aus [WOLF 2012]	26
2.19	Ferromagnetismus, aus [WOLF 2012]	26
2.20	Antiferromagnetismus, aus [WOLF 2012]	27
2.21	Ferrimagnetismus, aus [WOLF 2012]	27
2.22	Hysteresekurven, nach [CULLITY/GRAHAM 2009] und [KNELLER 1962]	27
2.23	Temperaturabhängigkeit der spontanen Magnetisierung, nach [KNELLER 1962]	28
2.24	Prinzip des Entmagnetisierungsfaktors, nach [HEPTNER/STROPPE 1972]	29
2.25	Magnetisierungsprozess längs der Neukurve, nach [KNELLER 1962]	30
2.26	Barkhausen-Sprünge in der Magnetisierungskurve, nach [KNELLER 1962]	31
3.1	Magnetisches Streufeld, nach [HEPTNER/STROPPE 1972]	33

4.1	Schematisches Bewehrungslayout mit Bruch	39
4.2	Permanentmagnet wird längs des Bewehrungsstabes bewegt . .	40
4.3	Magnetfeld des Permanentmagnets	40
4.4	Magnetisierungsrichtung	41
4.5	Remanente Magnetisierung des Bewehrungsstabes	41
4.6	Streufeld an der Bruchstelle	42
4.7	Remanenzmessung des Streufeldes	42
4.8	Aktivmessung des Streufeldes	43
4.9	Stabanfangs- und Stabendsignal eines Permanentmagnets	44
4.10	Bruchsignal aus Superposition von Stabend- und Stabanfangssi- gnal	45
4.11	Parameter der simulierten Bewehrungslayouts	47
4.12	Modellierung der Bewehrung als Aneinanderreihung von Scheibenmagneten	47
4.13	Nach Zufallsparametern simuliertes Bewehrungslayout	48
4.14	Netzarchitektur	48
4.15	Software für neuronales Netz	49
4.16	Anwendung des Template Matching auf ein Messbild	50
4.17	Untersuchung verschiedener Schadensarten per Aktivmessung .	52
4.18	Untersuchung verschiedener Schadensarten per Simulation . . .	53
4.19	Vergleich unterschiedlicher Signale	54
5.1	Messwagen Wolf remanent	55
5.2	Messwagen Wolf LabVIEW-Umgebung	55
5.3	Messwagen Wolf aktiv	56
5.4	Provisorische Magnetisierungseinrichtung	56
5.5	Prototyp 1 Hall analog	57
5.6	Prototyp 1 Hall analog: Komponenten	57
5.7	Auswechselbare Platinen mit je drei Hall-Sensoren	58
5.8	Vergleich analoger Hall-Sensoren	59
5.9	Prototyp 5 Hall analog	60
5.10	Prototyp 5 Hall analog: Komponenten	60
5.11	Prototyp 5 Hall analog: Detail der Kernverbindung	61
5.12	Vergleich zweier Kern-Entwürfe mittels Comsol Simulation . . .	62
5.13	Prototyp 20 Hall digital	63
5.14	Geometrieabhängige Umlagerung des Bruchsignals	64
5.15	Prototyp 20 Hall digital kernlos	65
5.16	Vergleich zwischen Doppelkern und kernlosen Spulen mittels Comsol Simulation	66
6.1	Überblick über die Software	69
6.2	Echtzeitmessung über die Breite	70
6.3	Echtzeitmessung über die Fläche	71
6.4	Aufnahmefunktion	71

6.5	Gespeicherte Messreihen in der Seitenleiste	72
6.6	Nachbearbeitung Informationen	72
6.7	Nachbearbeitung Bearbeiten	73
6.8	Nachbearbeitung Auflösung	73
6.9	Nachbearbeitung Kalibrierung	73
6.10	Kalibrierungsbeispiele	74
6.11	Nachbearbeitung Kontrast	76
6.12	Kontrastbeispiele	76
6.13	Nachbearbeitung Interpolation	77
6.14	Interpolationsbeispiele	78
6.15	Nachbearbeitung Berechnen	78
6.16	Werkzeuge für die Positionierung	79
6.17	Farbkanal	79
6.18	Vertikale Ausrichtung	79
6.19	Horizontale Ausrichtung	79
6.20	Koordinaten	79
6.21	Reihenfolge	80
7.1	Abmessungen und Ansichten der Platten, aus [SPATHELF 2016] .	82
7.2	Versuchsaufbau, aus [SPATHELF 2016]	83
7.3	Ankerkopf	85
7.4	Distanzhalter	85
7.5	Versuchskörper A1 bei Oberlast nach 1'140'040 Zyklen	90
7.6	Versuchskörper A1 bei Unterlast nach 1'140'040 Zyklen	91
7.7	Versuchskörper A2 bei Oberlast nach 825'514 Zyklen	92
7.8	Versuchskörper A2 bei Unterlast nach 825'514 Zyklen	93
7.9	Versuchskörper B1 bei Oberlast nach 271'345 Zyklen, 1. Lage . .	94
7.10	Versuchskörper B1 bei Unterlast nach 271'345 Zyklen, 1. Lage .	95
7.11	Versuchskörper B1 bei Oberlast nach 271'345 Zyklen, 2. Lage . .	96
7.12	Versuchskörper B1 bei Unterlast nach 271'345 Zyklen, 2. Lage .	97
7.13	Versuchskörper B2 bei Oberlast nach 219'728 Zyklen, 1. Lage . .	98
7.14	Versuchskörper B2 bei Unterlast nach 219'728 Zyklen, 1. Lage .	99
7.15	Versuchskörper B2 bei Oberlast nach 219'728 Zyklen, 2. Lage . .	100
7.16	Versuchskörper B2 bei Unterlast nach 219'728 Zyklen, 2. Lage .	101
7.17	A1: Freigelegte Brüche nach 1'140'040 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)	102
7.18	A2: Freigelegte Brüche nach 825'784 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)	103
7.19	B1: Freigelegte Brüche nach 271'524 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)	104
7.20	B2: Freigelegte Brüche nach 219'741 Zyklen (Fotos: Christian Spathelf)	105
8.1	Bewehrungsskizze aus [ZWICKY/VOGEL 2000]	107

8.2	Längsträger und überlagerte Messwerte mit Interpretation . . .	108
8.3	Sondagestellen (mit Phenolphthaleinlösung besprüht)	110

Tabellenverzeichnis

5.1	Technische Daten Messwagen Wolf aktiv	56
5.2	Technische Daten Prototyp 1 Hall analog	57
5.3	Vergleich analoger Hall-Sensoren	58
5.4	Technische Daten Prototyp 5 Hall analog	60
5.5	Technische Daten Prototyp 20 Hall digital	63
5.6	Technische Daten Prototyp 20 Hall digital kernlos	67
7.1	A1: Detektierbarkeit der Brüche	86
7.2	A2: Detektierbarkeit der Brüche	87
7.3	B1: Detektierbarkeit der Brüche	88
7.4	B2: Detektierbarkeit der Brüche	89

Literaturverzeichnis

- BARKHAUSEN, H.** (1919): „Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen“. In: *Physikalische Zeitschrift* 20, S. 401–403.
- BLOCH, F.** (1932): „Zur Theorie des Austauschproblems und der Remanenzerscheinung der Ferromagnetika“. In: *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei* 74, S. 295–335. DOI: 10.1007/BF01337791.
- BROCKHAUS, F. A.** (1998): „Brockhaus - Die Enzyklopädie in 24 Bänden“. 20. Aufl. Leipzig, Mannheim. ISBN: 3-7653-3100-7.
- BURGER, W.; BURGE, M. J.** (2015): „Digitale Bildverarbeitung - Eine algorithmische Einführung mit Java“. 3. Aufl. Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-04603-2. DOI: 10.1007/978-3-642-04604-9.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D.** (2009): „Introduction to Magnetic Materials“. Second Edition. Wiley. ISBN: 978-0-471-47741-9.
- DIEDERICH, H.; VOGEL, T.** (2014): „Detection of reinforcement bar fractures by measuring the remanent and active magnetic field“. In: *The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Québec: Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB), S. 369–373. DOI: 10.3929/ethz-a-010358419.
- (2015): „Break Detection in Reinforcing Bars Using the Magnetic Flux Leakage Method“. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin: NDT-CE 2015.
- (2016): „Evaluation of Reinforcing Bars Using the Magnetic Flux Leakage Method“. In: *Journal of Infrastructure Systems*. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000306.
- ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, I.** (2002): „The New Encyclopædia Britannica“. 15. Aufl. Chicago.
- FEHLMANN, P.** (2012): „Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken“. Diss. ETH Zürich. DOI: <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-007110386>.
- FEHLMANN, P.; WOLF, T.; VOGEL, T.** (2011): „Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken“. Versuchsbericht. ETH Zürich. DOI: 10.3929/ethz-a-007326286.
- HEPTNER, H.; STROPPE, H.** (1972): „Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung“. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- HILLEMEIER, B.; SCHEEL, H.** (2002): „Non-Destructive Location of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned and Prestressed Concrete“. In: *Transportation Research Board (TRB) Committee A2C03 - Concrete Bridges*.

- HILLEMEIER, B.; WALTHER, A.** (2007): „Schnelle zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlrissen in Querspanngliedern von Spannbetonbrücken“. In: *DGZfP-Jahrestagung*. 36.
- (2011): „Die Überprüfung von Spannbetonkonstruktionen auf Unversehrtheit der Spannglieder“. In: *Bautechnik* 88.11, S. 805–810. doi: 10.1002/bate.201101520.
- KNELLER, E.** (1962): „Ferromagnetismus“. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3540028642.
- KRIESEL, D.** (2007): „Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze“. URL: <http://www.dkriesel.com>.
- KUSENBERGER, F. N.; BARTON, J. R.** (Apr. 1981): „Detection of Flaws in Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Bridge Members“. Techn. Ber. Southwest Research Institute.
- LEUCHTMANN, P.** (2005): „Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie“. Pearson Studium. ISBN: 3-8273-7144-9.
- PAK, C.-I.** (2010): „Optimierung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens zur Stahlbruchortung in Bauwerken - Theoretische Weiterentwicklung“. Diss. Technische Universität Berlin.
- PERDIKARIS, P.; BEIM, S.** (1988): „RC Bridge Decks Under Pulsating and Moving Load“. In: *Journal of Structural Engineering* 114.3, S. 591–607.
- REY, G. D.; WENDER, K. F.** (2011): „Neuronale Netze - Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendung und Datenauswertung“. Verlag Hans Huber. ISBN: 978-3-456-84881-5.
- ROSENBAUM, S.** (2011): „Entwurf elektromagnetischer Aktoren unter Berücksichtigung von Hysterese“. Universitätsverlag Ilmenau. ISBN: 978-3-86360-008-2. URL: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-23792/ilm1-2011000261.pdf>.
- SAWADE, G.** (1999a): „Anwendung der Methode der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen“. In: *Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen*.
- (1999b): „Numerische Modellierung der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen“. In: *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen*, S. 338–351.
- SAWADE, G.; KRAUSE, H.-J.** (2007): „Inspection of Prestressed Concrete Members using the Magnetic Leakage Flux Measurement Method - Estimation of Detection Limit“. In: *Advances in Construction Materials*, S. 639–649.
- (2010): „Prüfung von Spannbetonbauteilen mit magnetischen Methoden“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 105.3, S. 154–164.
- SCHEEL, H.** (1997): „Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus“. Diss. Technische Universität Berlin.

- (2006): „Spanndrahtbruchortung mit der magnetischen Streufeldmethode“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101.8, S. 614–621. DOI: 10.1002/best.200600490.
- SCHEEL, H.; HILLEMEIER, B.** (Aug. 1997): „Capacity of the remanent magnetism method to detect fractures of steel in tendons embedded in prestressed concrete“. In: *NDT & E International* 30, S. 211–216. DOI: 10.1016/S0963-8695(96)00058-8.
- (Juni 2003): „Location of Prestressing Steel Fractures in Concrete“. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 15, S. 228–234. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(228).
- SCHNEIDER, E.; BINDSEIL, P.; BOLLER, C.; KURZ, W.** (2012): „Stand der Entwicklungen zur zerstörungsfreien Bestimmung der Längsspannung in Bewehrungsstäben von Betonbauwerken“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107, S. 244–254. DOI: 10.1002/best.201100083.
- SIA 262** (2013): *SIA 262 Betonbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SONODA, K.; HORIKAWA, T.** (1982): „Fatigue strength of reinforced concrete slabs under moving loads“. In: *Fatigue of Steel and Concrete Structures* 37, S. 455–462.
- SPATHELF, C.** (2016): „Fatigue Performance of Orthogonally Reinforced Concrete Slabs“. Unveröffentlichte Vorabversion vom 26.10.2015. Diss. ETH Zürich.
- STILLE, U.** (1944): „Der Entmagnetisierungsfaktor und Entelektrisierungsfaktor für Rotationsellipsoide“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 38, S. 91–101. DOI: 10.1007/BF02092674.
- SZIELASKO, K.; KLOSTER, A.; DOBMANN, G.; SCHEEL, H.; HILLEMEIER, B.** (Sep. 2006): „High-Speed, High-Resolution Magnetic Flux Leakage Inspection of Large Flat Surfaces“. In: ECNDT. Berlin. URL: <http://ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.1.3.3.pdf>.
- SZIELASKO, K.; YOUSSEF, S.; SOURKOV, A.; KURZ, J.; PUSHAREV, S.; BIRRINGER, R.** (2015): „Magnetic Flux Leakage Detection of Corrosion Damage in Prestressed Concrete Poles“. In: *Electromagnetic Nondestructive Evaluation XVIII*, S. 203–210. DOI: 10.3233/978-1-61499-509-8-203.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G.** (2009): „Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure“. 6. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. ISBN: 978-3-8274-1945-3.
- VERSCHUUR, G. L.** (1993): „Hidden Attraction - The History and Mystery of Magnetism“. Oxford University Press. ISBN: 0-19-506488-7.
- VOGEL, T.; ZWICKY, D.; JORAY, D.; DIGGELMANN, M.; HØJ, N. P.** (2009): „Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten“. Techn. Ber. 623. Bundesamt für Strassen.
- WALTHER, A.** (2012): „Vergleichende Signalinterpretation von Spannstahlbrüchen im remanent und aktiven magnetischen Streufeld“. Diss. Technische Universität Berlin.

- WARMUTH, K.** (1937): „Zur Darstellung des ballistischen Entmagnetisierungsfaktors zylindrischer Stäbe“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 31, S. 124–130. DOI: 10.1007/BF01873099.
- (1939): „Über den ballistischen Entmagnetisierungsfaktor zylindrischer Stäbe“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 33, S. 747–763. DOI: 10.1007/BF01657130.
- (1954): „Über den ballistischen Entmagnetisierungsfaktor zylindrischer Stäbe“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 41, S. 242–257. DOI: 10.1007/BF01471097.
- WEISS, P.** (1907): „L’hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique“. In: *J. Phys. Theor. Appl.* 6.1, S. 661–690.
- WOLF, T.** (2012): „Zur Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode“. Diss. ETH Zürich.
- ZWICKY, D.** (2002): „Zur Tragfähigkeit stark vorgespannter Betonbalken“. Diss. ETH Zürich.
- ZWICKY, D.; VOGEL, T.** (2000): „Bruchversuche an ausgebauten Brückenträgern aus Spannbeton“. Techn. Ber. ETH Zürich.